

Modellierung des Größeneffektes bei biegebeanspruchtem Fichtenschnittholz

Julia K. Denzler

München

Dezember 2007

Fachgebiet Physikalische Holztechnologie

Modellierung des Größeneffektes bei biegebeanspruchtem Fichtenschnittholz

Dipl.-Ing. Julia K. Denzler

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.rer.silv., Dr.rer.silv. habil., Dr.h.c. Gerd Wegener

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Glos
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heinrich Kreuzinger, i.R.
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Blaß,
Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

Die Dissertation wurde am 13.09.2007 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 26.11.2007 angenommen.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Zeitraum von April 2002 bis September 2007 während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Physikalische Holztechnologie der Holzforschung München der Technischen Universität München.

Die Anregung für diese Arbeit gab Prof. Dr.-Ing. Peter Glos. Er stellte mir neben seinem fundierten Fachwissen für die wissenschaftliche Untersuchung eine umfangreiche Datenbasis zur Verfügung, die sich nach intensiver Überarbeitung als äußerst wertvoll erwies. Seine weit über das Fachliche hinausgehende, unermüdliche Unterstützung schätze ich bis heute sehr. Seine inhaltlichen und grammatikalischen Verbesserungsvorschläge trugen wesentlich zu dieser Arbeit bei.

Prof. Dr.-Ing. Heinrich Kreuzinger danke ich für seine Bereitschaft, mich auch noch in seinem Ruhestand bei der Durchführung dieser Promotion zu unterstützen.

Meine Ausbildung im Vertiefungsschwerpunkt Holzbau an der Technischen Universität Karlsruhe durch Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Blaß veranlasste mich, eine Dissertation in diesem Fachgebiet zu erstellen. Ihm, Dr.-Ing. Rainer Görlacher und Dr.-Ing. Volker Krämer möchte ich für die stete Begleitung und Unterstützung meiner beruflichen Entwicklung bis zum heutigen Zeitpunkt danken.

Prof. Dr. Dr.habil Drs. h.c. Gerd Wegener danke ich für die Übernahme des Vorsitzes bei der Prüfungskommission.

Danken möchte ich auch allen Mitarbeitern der Technischen Universität München, die mich in meiner Arbeit unterstützten: Dipl.-Forstw. Peter Linsenmann für sein stets offenes Ohr in allen Belangen; Dr.-Ing. Patricia Hamm, Dipl.-Ing. Georg Gaede, Dipl.-Ing. Silv. (Univ.) Peter Stapel für die kritische Durchsicht der Arbeit; Johann Höger für die gewissenhafte und rastlose Durchführung der Versuche sowie Dipl.-Ing. Silv. (Univ.) Markus Deublein und Dipl.-Forstw. Thomas Näher für die beharrliche Aufnahme der Holzeigenschaften. Allen übrigen Mitarbeitern der Holzforschung München sei für die angenehme Arbeitsatmosphäre gedankt.

Schließlich möchte ich mich bei meinen Eltern Sibylle und Werner Denzler bedanken, die mit Rat und Tat einfühlsam meine Dissertation begleiteten und mich bei Rechtschreib- und Grammatikverbesserungen unterstützten. Für die unendliche Geduld und die wertvolle Hilfestellung bei Problemen, insbesondere mit der EDV, möchte ich mich bei Dipl.-Forstw. Olaf Strehl bedanken.

München im September 2007

Julia Denzler

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
2.	Derzeitiger Kenntnisstand	5
2.1	Allgemeines.....	5
2.2	Der Versagensmechanismus bei Biegung.....	5
2.3	Theorien zum Größeneffekt	8
2.3.1	Die Faserunterstützungstheorie von NEWLIN & TRAYER.....	8
2.3.2	Die Spröbruchtheorie von WEIBULL.....	8
2.3.3	Das Seil-Ketten-Modell von MISTLER	12
2.3.4	Bruchmechanische Modelle.....	13
2.3.5	Das „Schwachzonenmodell“ von KÄLLSNER ET AL.....	14
2.4	Der Größeneffekt bei ast- und fehlerfreien Prüfkörpern	14
2.5	Der Größeneffekt bei Schnittholz.....	17
2.6	Normative Regelungen	20
3.	Material und Methoden.....	25
3.1	Definitionen	25
3.2	Material	26
3.2.1	Aufarbeitung von vorhandenem Material.....	26
3.2.2	Zusätzlich geprüfetes Material.....	28
3.2.3	Zusammenstellung des Materials für die einzelnen Kapitel	30
3.3	Methoden	31
3.3.1	Erfassung der Holzabmessungen	31
3.3.2	Erfassung der Holzeigenschaft Ästigkeit.....	31
3.3.2.1	Allgemeines.....	31
3.3.2.2	Ästigkeit entsprechend DIN 4074-1	32
3.3.2.3	Ästigkeit entsprechend ECE	34
3.3.2.4	Zusätzlich berechnete Ästigkeiten	35
3.3.3	Erfassung der Holzfeuchte	37
3.3.4	Erfassung der Holzeigenschaft Darr-Rohdichte	37

3.3.5	Erfassung der Holzeigenschaft Jahrringbreite.....	38
3.3.6	Erfassung der Holzeigenschaft Druckholzanteil.....	39
3.3.7	Erfassung weiterer Holzeigenschaften.....	39
3.3.8	Erfassung der Biegefestigkeit.....	41
3.3.9	Statistische Auswerteverfahren.....	41
4.	Zusammenhänge zwischen Holzabmessungen, Holzeigenschaften und Biegefestigkeit.....	43
4.1	Definitionen.....	43
4.2	Einfluss der Holzabmessungen auf die Biegefestigkeit (größenspezifische Einflüsse).....	44
4.3	Einfluss der Holzeigenschaften auf die Biegefestigkeit (materialspezifische Einflüsse).....	46
4.3.1	Einfluss der Ästigkeit.....	46
4.3.2	Einfluss der Holzfeuchte.....	48
4.3.3	Einfluss der Darr-Rohdichte.....	49
4.3.4	Einfluss der Jahrringbreite.....	51
4.3.5	Einfluss des Druckholzanteils.....	52
4.3.6	Einfluss weiterer Holzeigenschaften.....	52
4.3.7	Wechselwirkungen der Holzeigenschaften untereinander.....	55
4.4	Einfluss der Holzabmessungen auf die Holzeigenschaften (geometrische Einflüsse).....	61
4.5	Zusammenfassung der Zusammenhänge zwischen Holzabmessungen, Holzeigenschaften und Biegefestigkeit.....	67
5.	Der Größeneffekt bei Standardbedingungen.....	69
5.1	Definitionen.....	69
5.2	Material.....	70
5.3	Modellbildung.....	74
5.3.1	Erläuterungen.....	74
5.3.2	Modellansatz.....	74
5.3.3	Auswahlverfahren und Bestimmung der Modellparameter.....	76
5.3.3.1	Problemstellung und Lösungsweg.....	76
5.3.3.2	Auswahl der Parameter des Modellansatzes.....	78
5.3.4	Bestimmung der Koeffizienten des Modellansatzes.....	86
5.3.4.1	Koeffizienten für ast- und fehlerfreie Prüfkörper.....	86
5.3.4.2	Koeffizienten für asthaltige Prüfkörper.....	87
5.4	Der direkte Größeneffekt.....	90
5.5	Der indirekte Größeneffekt.....	92
5.6	Der wirksame Größeneffekt.....	101
5.7	Zusammenfassung zum Größeneffekt bei Standardbedingungen.....	103
6.	Einfluss anderer Prüfbedingungen auf den Größeneffekt.....	107
6.1	Beliebige Lage der größten Ästigkeit im Querschnitt.....	107
6.2	Beliebiges Prüfverhältnis.....	108
6.3	Beliebige Lage der größten Ästigkeit in Längsrichtung.....	112

6.4	Zusammenfassung zum Einfluss anderer Prüfbedingungen auf den Größeneffekt.....	113
7.	Einfluss der Sortierung auf den Größeneffekt.....	115
7.1	Allgemeines.....	115
7.2	Visuelle Sortierung nach DIN 4074-1.....	115
7.3	Visuelle Sortierung nach US-amerikanischer Norm (National Grading Rule)	118
7.4	Maschinelle Sortierung.....	119
7.5	Zusammenfassung zum Einfluss der Sortierung auf den Größeneffekt.....	121
8.	Der Größeneffekt im Vergleich mit Literaturdaten	123
8.1	Ast- und fehlerfreie Prüfkörper	123
8.2	Asthaltige Prüfkörper.....	126
8.3	Zusammenfassung zum Größeneffekt im Vergleich mit Literaturdaten	129
9.	Diskussion	131
9.1	Allgemeines.....	131
9.2	Empfehlungen für die Normung	135
10.	Zusammenfassung.....	137
11.	Literatur	141
A.	Anhang	149

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1:	Schematische Darstellung einer 4-Punkt-Biegeprüfung nach EN 408.	2
Abb. 2.1:	Beispiel für eine Biegeprüfung an Schnittholz.	5
Abb. 2.2:	Spannungsverlauf im Biegeträger - idealisiert und tatsächlich.	6
Abb. 2.3:	Arbeitslinie bei Druckbelastung.	6
Abb. 2.4:	Mögliche Versagensarten bei Biegung.	7
Abb. 2.5:	Versagensmechanismen in der Bruchmechanik.	13
Abb. 2.6:	Vergleich der Höhenfaktoren von NEWLIN & TRAYER (1924) (BOHANNAN 1966), DAWLEY & YOUNGQUIST (1947) (BOHANNAN 1966), FREAS & SELBO (1954) (FEWELL & CURRY 1983), BOHANNAN (1966) und MADSEN (1990 b).	15
Abb. 2.7:	Derzeitige Höhenfaktoren entsprechend EN 1995-1-1 und EN 384.	21
Abb. 2.8:	Derzeitige Längenfaktoren entsprechend EN 384.	22
Abb. 3.1:	Definition der Prüfkörperabmessungen in Bezug auf die Prüffart.	25
Abb. 3.2:	Querschnittsabmessungen unterteilt nach Prüffart, n = 6244 PK.	27
Abb. 3.3:	Ast- und fehlerfreie Prüfkörperkollektive.	29
Abb. 3.4:	Gesamtüberblick Material.	30
Abb. 3.5:	Messung von Ästen in Kanthölzern (DEK).	33
Abb. 3.6:	Messung von Einzelästen in Brettern und Bohlen (DEB).	33
Abb. 3.7:	Messung von Astansammlungen in Brettern und Bohlen (DAB).	34
Abb. 3.8:	Berechnung der Ästigkeit tECE.	35
Abb. 3.9:	Berechnung der Ästigkeit mECE.	35
Abb. 3.10:	Berechnung der Ästigkeiten E_s1 und E_s2.	36
Abb. 3.11:	Prüfkörper-Rohdichte über Darr-Rohdichte, n = 3549 PK.	38
Abb. 3.12:	Ermittlung der Jahrringbreite in Anlehnung an DIN 4074-1.	39
Abb. 3.13:	Ermittlung des Markabstandes.	40
Abb. 3.14:	Ermittlung der Jahrringlage.	40
Abb. 3.15:	Vergleich der Korrelationskoeffizienten von SPEARMAN und PEARSON, n = 4156 PK.	42
Abb. 4.1:	Zusammenhänge zwischen Holzeigenschaften, Holzabmessungen und Biegefestigkeit.	43
Abb. 4.2:	Einfluss der Breite auf die Biegefestigkeit, n = 3899 PK.	45
Abb. 4.3:	Einfluss der Höhe auf die Biegefestigkeit, n = 3899 PK.	45
Abb. 4.4:	Einfluss der Stützweite auf die Biegefestigkeit, n = 3899 PK.	46
Abb. 4.5:	Biegefestigkeit über Ästigkeit tKAR, n = 3899 PK.	47
Abb. 4.6:	Biegefestigkeit über Ästigkeit mKAR, n = 3899 PK.	48
Abb. 4.7:	Häufigkeitsverteilung und Kennwerte der Holzfeuchte, n = 3899 PK.	49
Abb. 4.8:	Biegefestigkeit über Darr-Rohdichte, n = 3899 PK.	50
Abb. 4.9:	Biegefestigkeit über Jahrringbreite, n = 3899 PK.	51
Abb. 4.10:	Biegefestigkeit über Druckholzanteil, n = 3899 PK.	52
Abb. 4.11:	Biegefestigkeit über Markabstand, n = 3899 PK.	53
Abb. 4.12:	Biegefestigkeit für unterschiedliche Jahrringlagen, n = 3899 PK.	54

Abb. 4.13: Verteilung der Versagensarten bei Biegeprüfkörpern sortiert nach DIN 4074-1 und unsortiert, n = 3899 PK.	55
Abb. 4.14: Ästigkeit tKAR über Ästigkeit mKAR, n = 6244 PK.	57
Abb. 4.15: Markabstand über Ästigkeit tKAR und Markabstand über Ästigkeit mKAR, n = 3899 PK.	58
Abb. 4.16: Markabstand über Darr-Rohdichte und Markabstand über Jahrringbreite, n = 3899 PK.	58
Abb. 4.17: Darr-Rohdichte über Jahrringbreite, n = 6244 PK.	59
Abb. 4.18: Einfluss der Jahrringlage auf den Zusammenhang zwischen tKAR und mKAR, n = 3899 PK.	60
Abb. 4.19: Ästigkeit tKAR über Breite und Ästigkeit tKAR über Höhe, n = 6244 PK.	62
Abb. 4.20: Ästigkeit mKAR über Breite und Ästigkeit mKAR über Höhe, n = 6244 PK.	62
Abb. 4.21: Darr-Rohdichte über Breite und Darr-Rohdichte über Höhe, n = 6244 PK.	63
Abb. 4.22: Jahrringbreite über Breite und Jahrringbreite über Höhe, n = 6244 PK.	63
Abb. 4.23: Möglicher Einfluss der Holzabmessungen auf die Lage des Prüfkörpers im Stamm.	64
Abb. 4.24: Biegefestigkeit über Schnittholzquerschnitt, n = 3899 PK.	65
Abb. 4.25: Biegefestigkeit über Markabstand unterteilt in Querschnittsgröße, n = 3899 PK.	66
Abb. 5.1: Astlage entsprechend der größten mKAR-Ästigkeit.	70
Abb. 5.2: Prüfkörperanzahlen getrennt nach Prüfbedingungen, n = 4156 PK.	71
Abb. 5.3: Biegefestigkeit bei u = 12 % über Querschnittsbreite getrennt nach Kollektiv entsprechend Tab. A.6, n = 2889 PK.	72
Abb. 5.4: Charakteristische Biegefestigkeit bei u = 12 % über Querschnittsbreite getrennt nach Kollektiv entsprechend Tab. A.6, n = 289 PK.	72
Abb. 5.5: Biegefestigkeit bei u = 12 % über Querschnittshöhe getrennt nach Kollektiv entsprechend Tab. A.6, n = 2889 PK.	73
Abb. 5.6: Charakteristische Biegefestigkeit bei u = 12 % über Querschnittshöhe getrennt nach Kollektiv entsprechend Tab. A.6, n = 289 PK.	73
Abb. 5.7: Einteilung des Größeneffektes generell.	74
Abb. 5.8: Ablauf der schrittweisen Regressionsrechnung mit definierten Irrtumswahrscheinlichkeiten (y ... Zielgröße, x _i ... Einflussgrößen, n ... Anzahl an Regressionsgliedern und -koeffizienten, α ... Irrtumswahrscheinlichkeit 1. Ordnung, β ... Irrtumswahrscheinlichkeit 2. Ordnung).	77
Abb. 5.9: Multiple Regressionsanalyse der Biegefestigkeit, n = 2889 PK.	82
Abb. 5.10: Einteilung des Größeneffektes bei Standardbedingungen.	83
Abb. 5.11: Korrelationskoeffizienten r _{SP} unterschiedlicher Holzeigenschaften mit der Biegefestigkeit bei u = 12 % getrennt nach Höhenkategorie, n = 2889 PK.	85
Abb. 5.12: Biegefestigkeit bei u = 12 % über der Biegefestigkeit nach Gl. (5.11), n = 304 PK.	87
Abb. 5.13: Biegefestigkeit bei u = 12 % über der Biegefestigkeit nach Gl. (5.12), n = 1778 PK.	88
Abb. 5.14: Verteilung der Residuen aus im Versuch ermittelter Biegefestigkeit bei u = 12 % und der Biegefestigkeit nach Gl (5.12), n = 1778 PK.	89
Abb. 5.15: Biegefestigkeit bei u = 12 % über der Biegefestigkeit nach Gl. (5.12), n = 893 PK.	90
Abb. 5.16: Direkte Höhenfaktoren k _n über der Querschnittshöhe getrennt nach Höhenexponent.	91

Abb. 5.17: Direkter Größeneffekt nach Gl. (5.14) getrennt nach Quantil, n = 2889 PK.	92
Abb. 5.18: Normalverteilung der Darr-Rohdichte getrennt nach Breitenkategorie, n = 2889 PK.	94
Abb. 5.19: Normalverteilung der Darr-Rohdichte getrennt nach Höhenkategorie, n = 2889 PK.	94
Abb. 5.20: Lognormalverteilung der Jahrringbreite getrennt nach Breitenkategorie, n = 2889 PK.	95
Abb. 5.21: Lognormalverteilung der Jahrringbreite getrennt nach Höhenkategorie, n = 2889 PK.	95
Abb. 5.22: Normalverteilung der Ästigkeit tKAR getrennt nach Breitenkategorie, n = 2889 PK.	97
Abb. 5.23: Normalverteilung der Ästigkeit tKAR getrennt nach Höhenkategorie, n = 2889 PK.	97
Abb. 5.24: Normalverteilung der Ästigkeit mKAR getrennt nach Breitenkategorie, n = 2889 PK.	98
Abb. 5.25: Normalverteilung der Ästigkeit mKAR getrennt nach Höhenkategorie, n = 2889 PK.	98
Abb. 5.26: Indirekter Größeneffekt nach Gl. (5.15) über der Querschnittsbreite getrennt nach Quantil, n = 2889 PK.	100
Abb. 5.27: Indirekter Größeneffekt nach Gl. (5.15) über der Querschnittshöhe getrennt nach Quantil, n = 2889 PK.	100
Abb. 5.28: Wirksamer Breitenfaktor über der Querschnittsbreite getrennt nach über WEIBULL- Verteilung bestimmtem Quantil, n = 2889 PK. (Als Stützstellen der Quantilwerte wurden die Mediane der Kollektive verwendet.)	101
Abb. 5.29: Wirksamer Größeneffekt über der Querschnittshöhe getrennt nach über WEIBULL- Verteilung bestimmtem Quantil, n = 2889 PK. (Als Stützstellen der Quantilwerte wurden die Mediane der Kollektive verwendet.)	102
Abb. 5.30: Direkter Höhenfaktor nach Gl. (5.12).	104
Abb. 5.31: Wirksamer Breitenfaktor getrennt nach Quantil, n = 2889 PK.	105
Abb. 5.32: Wirksamer Höhenfaktor getrennt nach Quantil, n = 2889 PK.	105
Abb. 6.1: Biegefestigkeit bei u = 12 % über Querschnittshöhe getrennt nach Lage der größten Ästigkeit, n = 517 PK.	108
Abb. 6.2: Einteilung des Größeneffektes bei beliebigem Prüfverhältnis s / h.	109
Abb. 6.3: Biegefestigkeit bei u = 12 % über der Biegefestigkeit nach Gl. (6.2), n = 3146 PK.	110
Abb. 6.4: Biegefestigkeit bei u = 12 % über der Biegefestigkeit nach Gl. (6.2), n = 493 PK.	111
Abb. 6.5: Einfluss der Länge auf die Ästigkeit tKAR unterteilt nach Querschnittshöhe, n = 1496 PK. ...	113
Abb. 7.1: Biegefestigkeit bei u = 12 % über der Querschnittshöhe für die Sortierklasse S 7 getrennt nach Quantil, n = 421 PK.	116
Abb. 7.2: Biegefestigkeit bei u = 12 % über der Querschnittshöhe für die Sortierklasse S 10 getrennt nach Quantil, n = 1199 PK.	117
Abb. 7.3: Biegefestigkeit bei u = 12 % über der Querschnittshöhe für die Sortierklasse S 13 getrennt nach Quantil, n = 648 PK.	117
Abb. 7.4: Visuelle Sortierung nach DIN 4074-1 (oben) im Vergleich zu NGR (unten), n = 517 PK.	119
Abb. 7.5: Biegefestigkeit bei u = 12 % über der Querschnittshöhe getrennt nach Festigkeitsklasse auf dem 50%-Quantilniveau, n = 2889 PK.	120
Abb. 7.6: Biegefestigkeit bei u = 12 % über der Querschnittshöhe getrennt nach Festigkeitsklasse auf dem 5%-Quantilniveau, n = 2889 PK.	121

Abb. 8.1: Biegefestigkeit nach Gl. (8.1) im Vergleich zu den Biegefestigkeitswerten von BOHANNAN (1966).....	124
Abb. 8.2: Biegefestigkeit nach Gl. (8.1) im Vergleich zu den Biegefestigkeitswerten von COMBEN (1957), MALHOTRA & BAZAN (1980) und MADSEN (1990 b).....	125
Abb. 8.3: Charakteristische Biegefestigkeitswerte von MADSEN & STINSON (1982) und MARCHAND & FUX (1983) im Vergleich zum Breiteneffekt nach Abb. 5.28.....	127
Abb. 8.4: Höhenfaktoren berechnet aufgrund der in Tab. A.5 angegebenen Höhenexponenten getrennt nach Literaturstelle (Bezugshöhe $h = 200$ mm gewählt, falls unbekannt).....	128
Abb. 10.1: Aufteilung des Größeneffektes in Teileffekte.....	138

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Versuchsumfang von BOHANNAN (1966).....	16
Tab. 2.2: Größenfaktor für biegebeanspruchtes, visuell sortiertes Schnittholz mit Rechteckquerschnitt nach CSA 086-01 (Kanada).....	23
Tab. 2.3: Sortierkriterien und Prüfanordnung bei Ermittlung der Biegefestigkeit in Europa, USA/Kanada und Australien/Neuseeland (BARETT & LAM 1994).....	23
Tab. 3.1: Versuchsdaten getrennt nach Prüfmethode und Breiten- und Höhenkategorie.....	27
Tab. 3.2: Holzabmessungen der ast- und fehlerfreien Prüfkörperkollektive mit $b = 40$ mm.....	28
Tab. 3.3: Schnittholzeinteilung nach DIN 4074-1.....	32
Tab. 4.1: Korrelationskoeffizienten r_{SP} der Ästigkeiten zur Biegefestigkeit getrennt nach Prüfmethode.....	47
Tab. 4.2: Korrelationskoeffizienten r_{SP} zwischen der Biegefestigkeit, der Darr-Rohdichte und der Prüfkörper-Rohdichte, ($n = 3899$ PK und $n = 3549$ PK).....	50
Tab. 4.3: Einfluss der Jahrringlage auf die Biegefestigkeit, $n = 3899$ PK.....	54
Tab. 4.4: Korrelationskoeffizienten r_{SP} der Holzeigenschaften untereinander, $n = 6244$ PK und $n = 3899$ PK.....	56
Tab. 4.5: Korrelationskoeffizienten r_{SP} der Biegefestigkeit und der Ästigkeiten t_{KAR} und m_{KAR} in Abhängigkeit der Längskoordinaten $n = 6244$ PK.....	57
Tab. 4.6: Korrelationskoeffizienten r_{SP} zwischen Holzabmessungen und Holzeigenschaften, $n = 6244$ PK und $n = 3899$ PK.....	61
Tab. 4.7: Abhängigkeiten zwischen der Biegefestigkeit, den Holzabmessungen und den Holzeigenschaften.....	67
Tab. 5.1: Definition der unterschiedlichen Prüfbedingungen.....	69
Tab. 5.2: Ordinale Codierung der Jahrringlage entsprechend der Prüfmethode.....	79
Tab. 5.3: Multiple Regressionsanalyse der Biegefestigkeit, $n = 2889$ PK.....	81
Tab. 5.4: Wahl des Ansatzes zur Beschreibung des indirekten Größeneffektes, $n = 2889$ PK.....	84
Tab. 7.1: Regressionsgleichungen getrennt nach visuellen Sortierklassen, $n = 2268$ PK.....	116

Tab. 8.1: Biegefestigkeit nach Gl. (8.1) im Vergleich zu den Biegefestigkeitswerten von BOHANNAN (1966).	124
Tab. 8.2: Biegefestigkeit nach Gl. (8.1) im Vergleich zu den Biegefestigkeitswerten von COMBEN (1957), MALHOTRA & BAZAN (1980) und MADSEN (1990 b).	125
Tab. A.1: Literaturstellen zu Festigkeitswerten von ast- und fehlerfreien Prüfkörpern.....	149
Tab. A.2: Formeln zur Berücksichtigung des Größeneffektes bei ast- und fehlerfreien Prüfkörpern.....	150
Tab. A.3: Literaturstellen zum Größeneffekt bei Schnittholz.	151
Tab. A.4: Literaturstellen zum Größeneffekt bei Schnittholz - Auswertung von Fremdversuchen.....	153
Tab. A.5: Überblick über die in der Literatur verfügbaren Größenexponenten.	154
Tab. A.6: Kollektive getrennt nach Prüfmethode und Querschnittsabmessungen, n = 6244 PK.....	156
Tab. A.7: Korrelationskoeffizienten r_{SP} von den Ästigkeiten zur Biegefestigkeit getrennt nach Querschnitt.	157

Abkürzungsverzeichnis

A	Astansammlung
a_i	Astabmessung parallel zur Querschnittsseite in mm
A_s1	Ästigkeit berechnet mit dem 1. statischen Moment der Astansammlung
A_s2	Ästigkeit berechnet mit dem 2. statischen Moment der Astansammlung
b	Prüfkörperbreite bzw. Querschnittsbreite in mm
b_0	Breitenexponent
BF	Biegung flachkant
BH	Biegung hochkant
c_i	Konstante i im Rahmen der Regressionsrechnung
C 16...C 40	Festigkeitsklassen nach DIN EN 338
CF18 ... CF30	Festigkeitsklasse nach französischer Norm
d	Dicke in mm
d_i	Astdurchmesser des Astes i in mm
DAB	Kriterium Astansammlung Bretter und Bohlen nach DIN 4074-1
DEB	Kriterium Einzelast Bretter und Bohlen nach DIN 4074-1
DEK	Kriterium Einzelast Kantholz nach DIN 4074-1
dh	Druckholzanteil in %
ε	Dehnung
E	Einzelast
E(x)	Erwartungswert in Abhängigkeit von x
ECE	Economic Commission for Europe
E_s1	Ästigkeit berechnet mit dem statischen Moment 1. Ordnung des Einzelastes
E_s2	Ästigkeit berechnet mit dem statischen Moment 2. Ordnung des Einzelastes
f_m	Biegefestigkeit in N/mm ²
F_{max}	Bruchlast in N
$f_{m,mean}$	Mittelwert der Biegefestigkeit in N/mm ²
$f_{m,k}$	5%-Quantilwert der Biegefestigkeit = charakteristische Biegefestigkeit in N/mm ²
F(σ)	Verteilungsfunktion
g_0	kombinierter Höhen- und Längenexponent
h	Prüfkörperhöhe bzw. Querschnittshöhe in mm
h_0	Höhenexponent
IP	Indicating Property = Sortierparameter bei einer maschineller Sortierung in N/mm ²
jrb	Jahrringbreite in mm
jrl	Jahrringlage
k	Kraftweite = Abstand der Lastangriffspunkte in mm
k_b	Breitenfaktor
k_h	Höhenfaktor
k_s	Längenfaktor
K_I	Spannungsintensitätsfaktor im Bruchmodus I
K_{II}	Spannungsintensitätsfaktor im Bruchmodus II
K_{IC}	Spannungsintensitätsfaktor beim Versagen (Bruchzähigkeit) im Bruchmodus I
K_{IIC}	Spannungsintensitätsfaktor beim Versagen (Bruchzähigkeit) im Bruchmodus II
KAR	Knot Area Ratio

ℓ	Prüfkörperlänge in mm
ℓ_{Holz}	Schnittholzlänge in mm
m	Markabstand in mm
M_{max}	maximal aufnehmbares Moment in Nmm
m_0	Masse des Probestreifens im darrtrockenen Zustand ($u = 0 \%$) in g
m_u	Masse des Probestreifens bei der Holzfeuchte u in g
Max.	Maximum in Abhängigkeit des Parameters
mECE	Astwert im Randbereich nach ECE-Sortiervorschlag
Min.	Minimum in Abhängigkeit des Parameters
mKAR	Astwert im Randbereich nach KAR-Sortiervorschlag
MW	Mittelwert in Abhängigkeit des Parameters
n	Anzahl
No.2	Sortierklasse „Number 2“ nach National Grading Rule
NGR	Sortierregel National Grading Rule im US-amerikanischen Raum
ρ	Formparameter
PK	Prüfkörper
ρ_0	Darr-Rohdichte (ermittelt am Probestreifen) in kg/m^3
ρ_{PK}	Prüfkörper-Rohdichte (ermittelt am Prüfkörper) in kg/m^3
$r = r_{\text{SP}}$	Korrelationskoeffizient (nach SPEARMAN)
$r^2 = r_{\text{SP}}^2$	Bestimmtheitsmaß (nach SPEARMAN)
s	Stützweite = Abstand der Auflager in mm
S 7...S 13	Sortierklassen nach DIN 4074-1
$S(x)$	Versagenswahrscheinlichkeiten eines Teilelementes in einem Gebiet x
s_0	Längen- oder Stützweitenexponent
s_r	Standardabweichung des Residuums in N/mm^2
s_{ges}	Gesamtstandardabweichung in N/mm^2
SS	Sortierklasse „Select Structural“ nach National Grading Rule
σ	Spannung in N/mm^2
σ_D	Druckspannung (im Rahmen einer Biegeprüfung) in N/mm^2
σ_m	Maßstabparameter in N/mm^2
σ_u	Materialmindestfestigkeit bzw. Ortsparameter in N/mm^2
σ_Z	Zugspannung (im Rahmen einer Biegeprüfung) in N/mm^2
$t(\sigma)$	materialabhängige Spannungsfunktion
tECE	Astwert im Querschnitt nach ECE-Sortiervorschlag
tKAR	Astwert im Querschnitt nach KAR-Sortiervorschlag
u	Holzfeuchte in %
V	Volumen in mm^3
VK	Variationskoeffizient in %
W	Widerstandsmoment in mm^3
Z	Zug

1. Einleitung

Holz wird seit Menschengedenken als Baustoff verwendet. Über Jahrhunderte wurden die Bauteile auf der Grundlage einer langjährigen Erfahrung und weniger Untersuchungen dimensioniert. Erst ab 1826 stand mit NAVIERS technischer Biegelehre ein mathematisches Werkzeug zur Bemessung von Bauteilen zur Verfügung (STÜSSI 1969). Die erste Ausgabe der Holzbaunorm DIN 1052, in der die Grundlage der Bemessung von Holzbauteilen in Deutschland erstmals zusammenfassend geregelt ist, erschien 1933. Im Interesse der Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit des Bauens mit Holz wurden die zunächst sehr elementaren Bemessungsregeln auf der Grundlage laufender Forschungs- und Entwicklungsarbeiten und damit zunehmender Kenntnis der auftretenden Beanspruchungen und des Materialverhaltens in mehreren Schritten immer weiter differenziert. Im Rahmen der europäischen Normung wurde erstmals explizit ein globaler Größenfaktor zur Berücksichtigung des Einflusses der Holzabmessungen auf dessen Festigkeitseigenschaften eingeführt. Die in den Produktnormen definierte charakteristische Biegefestigkeit wird dazu auf Bauteile mit einer Querschnittshöhe von $h = 150 \text{ mm}$ und eine Prüfanordnung nach EN 408 bezogen. Für Bauteile mit einer Querschnittshöhe abweichend von $h = 150 \text{ mm}$ gibt EN 384 einen von der Festigkeitsklasse unabhängigen Korrekturfaktor an, der für die Umrechnung der charakteristischen Biegefestigkeit auf eine Querschnittshöhe von $h = 150 \text{ mm}$ herangezogen werden muss:

$$k_h = (150 / h)^{0.2} \quad (1.1)$$

Der Faktor k_h wird als Höhenfaktor bezeichnet und soll den Einfluss der Querschnittshöhe auf die charakteristische Biegefestigkeit bei Schnittholz abdecken. Ein Einfluss der Breite auf die Biegefestigkeit wird in EN 384 nicht berücksichtigt.

Die charakteristischen Biegefestigkeitswerte nach EN 338 beziehen sich auf einen Auflagerabstand von $s = 18 \cdot h$ mit Kraffteinleitung in den Drittelpunkten ($k = 6 \cdot h$) (Abb. 1.1). Wird von diesem Verhältnis abgewichen, muss die ermittelte Biegefestigkeit mit dem Faktor

$$k_s = (48 \cdot h / (s + 5 \cdot k))^{0.2} \quad (1.2)$$

auf einen Auflagerabstand von $s = 18 \cdot h$ mit Kraffteinleitung in den Drittelpunkten angepasst werden.

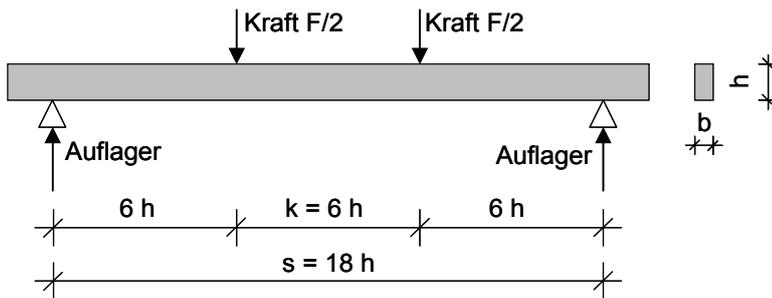


Abb. 1.1: Schematische Darstellung einer 4-Punkt-Biegeprüfung nach EN 408.

Der Größeneffekt beschreibt den Einfluss des Volumens oder einer einzelnen Abmessung auf die Festigkeit eines Baustoffes. In der Literatur sind stark unterschiedliche Werte für den Größeneffekt veröffentlicht. Insbesondere ist nicht geklärt, ob und wie diese Faktoren zur Berücksichtigung des Größeneffektes von der Schnittholzqualität abhängen. EN 384 gibt die Faktoren für alle Festigkeitsklassen gleich groß an. Das bedeutet, dass der Größeneffekt unabhängig von der Schnittholzqualität sein müsste. Darüber hinaus wird der Größeneffekt vermutlich auch von der Anordnung des Prüfkörpers in der Prüfeinrichtung beeinflusst: Nach EN 384 muss bei der Ermittlung der Biegefestigkeit ein kritischer Querschnitt gewählt werden, „an dem nach Augenschein und nach anderen Informationen, wie z. B. den Messwerten einer Festigkeitssortiermaschine, vermutlich der Bruch eintreten wird“ (DIN EN 384:2004-05, Abschnitt 5.2). Der kritische Querschnitt muss im Bereich der maximalen Beanspruchung und damit im mittleren Drittel der Prüfkörperlänge angeordnet werden. Im Vergleich zu einer zufällig gewählten Prüfanordnung, wie sie z.B. in Nordamerika üblich ist, führt diese Bedingung zu einer geringeren Festigkeit und beeinflusst den Längenfaktor, da die statistische Wahrscheinlichkeit des Zusammentreffens von größter Beanspruchung und kritischem Querschnitt verändert wird.

Ziel der Arbeit ist, den Größeneffekt bei Schnittholz unter Beachtung europäischer Prüfvorschriften zu erfassen und zu modellieren. Dabei soll neben dem direkten Größeneffekt, d.h. dem unmittelbaren Zusammenhang zwischen den Holzabmessungen und den Festigkeitseigenschaften, auch der indirekte Größeneffekt beachtet werden, der sich aus dem Zusammenhang zwischen den Holzabmessungen und den Holzeigenschaften einerseits und den Holzeigenschaften und den Festigkeitseigenschaften andererseits ergibt.

Auf der Grundlage einer breiten Datenbasis werden alle wesentlichen, die Festigkeit beeinflussenden Holzeigenschaften erfasst und die Biegefestigkeit nach europäischen Prüfvorschriften für unterschiedliche Holzabmessungen ermittelt. Anhand der Ergebnisse sollen die wesentlichen Einflussgrößen der Biegefestigkeit identifiziert und mit Ihnen ein Modell zur Beschreibung der Biegefestigkeit erarbeitet werden. Das Modell soll dazu dienen, die Wechselwirkungen zwischen den Holzabmessungen, den Holzeigenschaften und der Biegefestigkeit zu klären und damit ein besseres Verständnis der Zusammenhänge zu geben. Hierbei müssen auch die Prüfbedingungen und deren Auswirkungen auf die Biegefestigkeit und damit auf den Größeneffekt beachtet werden.

Mit Hilfe dieses Modells soll geklärt werden:

- ob es einen direkten Einfluss der Holzabmessungen auf die Biegefestigkeit gibt,
- ob der Größeneffekt durch materialspezifische und geometrische Einflüsse überlagert wird,
- welchen Einfluss die Holzabmessungen insgesamt auf die Biegefestigkeit besitzen,
- ob der Größeneffekt abhängig von der Schnittholzqualität ist,
- ob die in der Literatur vorhandenen und sich zum Teil widersprechenden Angaben zum Größeneffekt erklärt werden können.

2. Derzeitiger Kenntnisstand

2.1 Allgemeines

Unter dem Begriff Größeneffekt wird der Einfluss des Volumens oder einer einzelnen Abmessung auf die Festigkeit eines Baustoffes zusammengefasst. Für homogene Werkstoffe wird unterstellt, dass die Festigkeit mit zunehmendem Volumen abnimmt. Ob dieser Zusammenhang auf inhomogene Werkstoffe wie Bauholz übertragen werden kann und durch welche Abmessung oder welche Kombination aus Abmessungen die Festigkeit am stärksten beeinflusst wird, ist umstritten. Im Folgenden werden der Versagensmechanismus bei Biegung, die unterschiedlichen Theorien zum Größeneffekt, die bisher vorliegenden Untersuchungsergebnisse und die geltenden normativen Regelungen zusammenfassend dargestellt.

2.2 Der Versagensmechanismus bei Biegung

Die Biegefestigkeit eines Prüfkörpers wird ermittelt, indem der auf zwei Auflagern ruhende Prüfkörper bis zum Bruch belastet wird. Dabei biegt sich der Prüfkörper durch, bis er schließlich der Auflast nicht mehr gewachsen ist und versagt (Abb. 2.1).

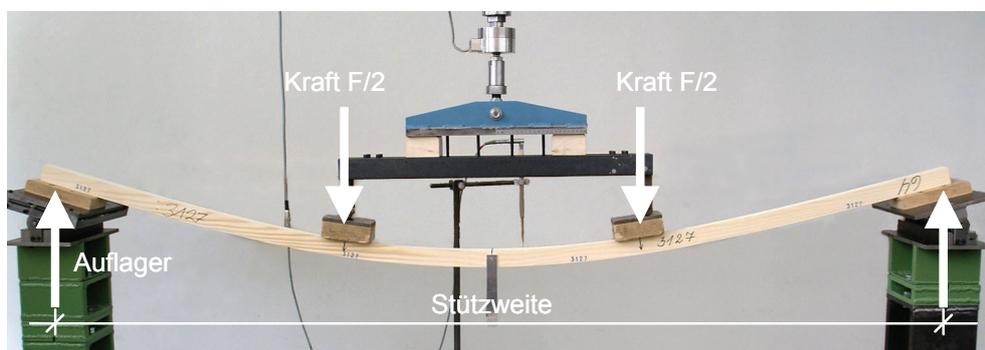


Abb. 2.1: Beispiel für eine Biegeprüfung an Schnittholz.

Durch die Biegebeanspruchung entstehen im Prüfkörper innere Spannungen. Auf der oberen Prüfkörperseite entstehen Druck-, auf der unteren Prüfkörperseite Zugspannungen, die jeweils von innen nach außen zunehmen (Abb. 2.2). Die Spannungen sind am Rand des Biegeträgers am größten, in der

neutralen Faser ist der Prüfkörper biegespannungsfrei. In der technischen Mechanik wird bei Biegung vereinfachend ein linearer Spannungsverlauf über den Prüfkörperquerschnitt angenommen (Abb. 2.2). Tatsächlich beginnen die Fasern im Druckbereich beim Erreichen der Druckfestigkeit zu plastizieren (Abb. 2.3), der Druckspannungsverlauf wird parabelförmig, der Zugspannungsverlauf bleibt linear, die Spannungsnulllinie verschiebt sich in die Richtung der maximalen Zugbelastung (ZAKIĆ 1973, Abb. 2.2).

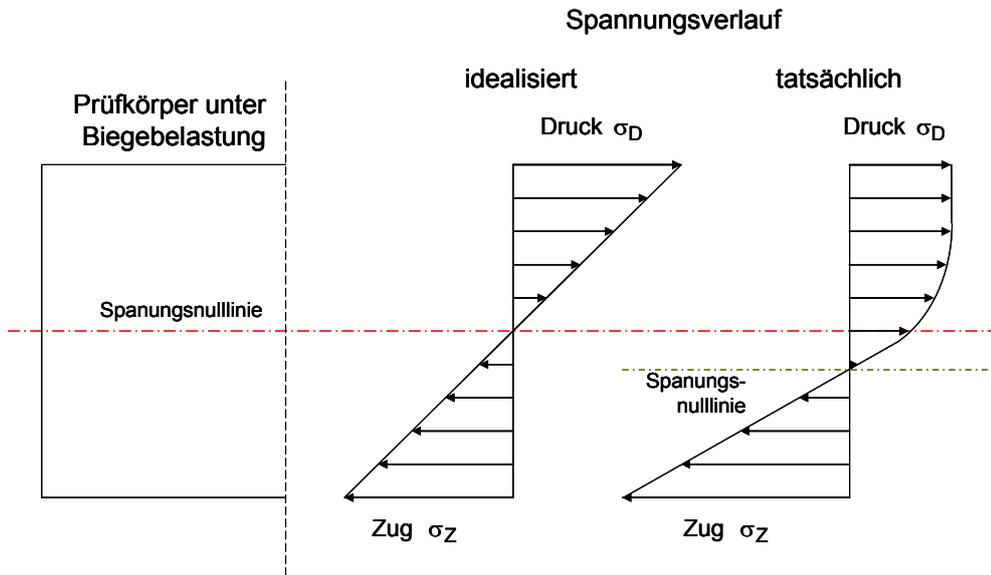


Abb. 2.2: Spannungsverlauf im Biegeträger - idealisiert und tatsächlich.

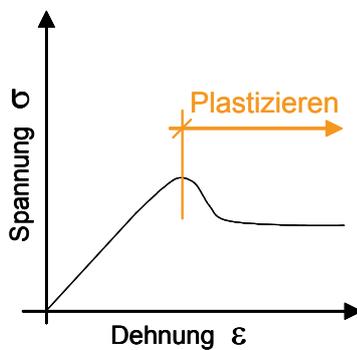


Abb. 2.3: Arbeitslinie bei Druckbelastung.

Ob der Prüfkörper im Druckbereich oder im Zugbereich versagt, hängt von den Holzeigenschaften und deren Verteilung im Prüfkörper ab. Für ast- und fehlerfreies Holz übersteigt die Zugfestigkeit die Druckfestigkeit, so dass sich zuerst durch Druckfaltenbildung ein Druckversagen auf der Oberseite des Trägers einstellt, bevor der Prüfkörper durch die zunehmende Zugspannung auf der Unterseite des Trägers auf Zug versagt. Bei Schnittholz wird die Biegefestigkeit vor allem durch makroskopische Störstellen (Äste) und die durch diese hervorgerufenen Faserabweichungen beeinflusst. Die Zugfestigkeit von Schnittholz ist in der Regel geringer als die Druckfestigkeit, was zu einem Zugversagen führt.

Je nach Versagensart ergeben sich bei der Biegeprüfung unterschiedliche Spannungs-Dehnungslinien. Abb. 2.4 zeigt idealisiert die unterschiedlichen Versagensmechanismen bei Biegung. Sprödes Bruchverhalten zeichnet sich durch einen plötzlichen Zugbruch aus, der sich nicht oder durch nur unwesentlich stärkere Dehnungen ankündigt. Duktilen Versagen ist durch eine stark ausgeprägte Dehnung bei weitgehender Lastkonstanz definiert. Ein sich wiederverfestigender Bruch zeigt deutliche, plötzliche Spannungsabfälle, wobei der Prüfkörper nach dem Spannungsabfall über das vorherige Höchstniveau hinaus weiter belastet werden kann. Bei einem sich wiederverfestigenden Bruch finden so genannte Spannungsumlagerungen statt. Der durch den Teilbruch geschwächte Bereich des Prüfkörpers gibt Last an ungeschwächte Bereiche im Prüfkörper ab, so dass die Gesamtbelastung weiter gesteigert werden kann. Bei der Ermittlung der Zugfestigkeit findet vornehmlich sprödes und damit plötzliches Versagen statt, während bei der Ermittlung der Druckfestigkeit ein stark duktiler Bruch mit Druckfaltenbildung vorherrscht. Da die Biegeprüfung sowohl zug- als auch druckbeanspruchte Bereiche aufweist, können je nach Holzqualität alle in Abb. 2.4 dargestellten Versagensmechanismen auftreten.

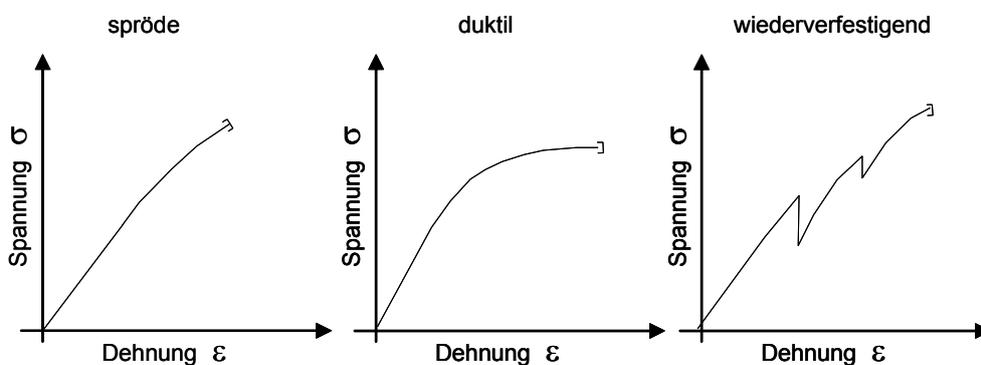


Abb. 2.4: Mögliche Versagensarten bei Biegung.

Die Festigkeit gibt die Spannung beim Versagen eines Prüfkörpers an. Je nach Prüfmethode wird bei Holz zwischen Biege-, Zug-, Druck- und Schubfestigkeit unterschieden. Neben der Holzqualität hängt die Festigkeit von den Holzabmessungen und den Prüfbedingungen ab. Bei Biegung wird im Rahmen dieser Arbeit die Querschnittsabmessung rechtwinklig zur Krafteinleitung mit Breite b , die Querschnittsabmessung parallel zur Krafteinleitung mit Höhe h bezeichnet. Im Rahmen dieser Arbeit wird vorrangig die im 4-Punkt-Biegeversuch ermittelte Festigkeit untersucht, wobei der Abstand der Auflager mit Stützweite s , der Abstand der Lastangriffspunkte mit Kraftweite k bezeichnet wird (Abb. 1.1).

Die Biegefestigkeit f_m gibt das Verhältnis zwischen Biegemoment M_{\max} und Widerstandsmoment W des Querschnitts an. Für rechteckige Querschnittsformen unter den in Abb. 1.1 dargestellten Prüfbedingungen wird die Biegefestigkeit entsprechend Gl. (2.1) berechnet:

$$f_m = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{\max} \cdot (s - k)}{b \cdot h^2} \quad (2.1)$$

Die Bruchlast F_{\max} nimmt mit zunehmendem Querschnitt und abnehmender Stützweite zu. Im Gegensatz dazu nimmt die Biegefestigkeit f_m mit zunehmendem Volumen ab. Diese Erkenntnis basiert auf sehr unterschiedlichen Versuchsergebnissen und entsprechend vielen Theorien, die zur Beschreibung und Erklärung des Größeneffektes entstanden sind. Im Folgenden werden die wichtigsten Theorien kurz dargestellt.

2.3 Theorien zum Größeneffekt

2.3.1 Die Faserunterstützungstheorie von NEWLIN & TRAYER

Die Theorie von NEWLIN & TRAYER wurde bereits 1924 entwickelt (BUCHANAN 1983). Aufgrund ihrer Biegeversuche an Prüfkörpern mit unterschiedlichen Querschnittsformen stellten NEWLIN & TRAYER fest, dass die Biegefestigkeit kleiner ast- und fehlerfreier Prüfkörper größer ist als die Biegefestigkeit großer ast- und fehlerfreier Prüfkörper. Die Theorie basiert auf der Annahme, dass außen liegende, druckbeanspruchte Fasern von weniger stark druckbeanspruchten Fasern in der Nähe der neutralen Achse eines Querschnitts unterstützt werden und somit die Festigkeit erhöht wird. Bei hohen Trägern liegen die hoch beanspruchten Randfasern weit entfernt von den weniger stark beanspruchten Fasern entlang der neutralen Achse. Die Faserunterstützung wird nicht wirksam. Bei gedrungenen Querschnitten ist der Spannungsgradient größer, die Spannung nimmt von außen nach innen stärker ab. Hoch beanspruchte Randfasern liegen näher an den weniger stark beanspruchten Fasern der neutralen Achse, die die Randfasern entlasten. Mit Hilfe der Faserunterstützungstheorie lässt sich u.a. auch erklären, warum die Druckspannung der Randfasern im Biegeversuch die maximal aufnehmbare Druckspannung parallel zur Faser eines reinen Druckversuchs überschreiten kann.

Die Faserunterstützungstheorie erklärt die Abnahme der Biegefestigkeit mit zunehmender Querschnittsgröße rein über die Druckbeanspruchung. Voraussetzung ist eine gewisse Plastizität des Materials. Sprödbrüche, die bei Holz in Gebrauchsabmessungen in der Zugzone entstehen können, werden über diese Theorie nicht abgedeckt. Die Zugfestigkeit wird als Materialkonstante angesehen, die unabhängig von der Querschnittsgröße ist. Das bedeutet, dass die Zugfestigkeit keinem Größeneffekt unterliegen würde. Aus neueren Untersuchungen ist jedoch bekannt, dass sowohl zentrisch druck- als auch zentrisch zugbeanspruchte Bauteile einem Größeneffekt unterliegen (u.a. MADSEN 1992, BURGER 1998).

2.3.2 Die Sprödbruchtheorie von WEIBULL

Die am häufigsten verwendete Theorie in Zusammenhang mit dem Größeneffekt ist die so genannte WEIBULL-Theorie. Basis der Theorie sind Untersuchungen von PIERCE (1926) an Baumwolle und TUCKER (1927) an Beton (BUCHANAN 1983). Die Weiterentwicklung durch WEIBULL (1939 a,b) gibt der Theorie ihren Namen. Eine 1976 von PIERCE veröffentlichte Arbeit über die Herleitung der Verteilungsparameter für die 2- und 3-parametrische WEIBULL-Verteilung erleichtert deren Anwendung in danach durchgeführten Untersuchungen.

Die Spröbruchtheorie ist auch unter dem Namen „Theorie des schwächsten Gliedes“ bekannt. Sprödes Material wird modellhaft in einzelne Teilelemente zerlegt, deren Festigkeitseigenschaften statistisch verteilt sind. Werden die Einzelemente entlang einer Kette aufgereiht und diese belastet, wird diese Kette versagen, wenn das schwächste Glied der Kette versagt. Das eindimensionale Kettenmodell lässt sich auf einen Körper übertragen, indem ein dreidimensionaler Körper sowohl über die Länge als auch über den Querschnitt in einzelne Teilelemente zerlegt wird. Das ganze Bauteil versagt schlagartig, sobald das schwächste Element im Körper versagt. Materialien, die spröde versagen, sind einem Größeneffekt unterworfen. Je größer das beanspruchte Volumen ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines im Vergleich zu den Nachbarelementen schwachen Elementes. Der Größeneffekt wird deshalb in denjenigen Materialien ausgeprägt sein, die eine große Streuung der Materialeigenschaften besitzen. WEIBULL gelingt es 1939, diese theoretischen Zusammenhänge mathematisch umzusetzen. Wird die Versagenswahrscheinlichkeit eines Teilelements in einem Gebiet x mit $S(x)$ bezeichnet, die Versagenswahrscheinlichkeit eines Teilelements im Gebiet y mit $S(y)$, ergibt sich bei Unabhängigkeit der Versagenswahrscheinlichkeiten Gl. (2.2):

$$S(x + y) = S(x) \cdot S(y) \quad (2.2)$$

und mit der Differentiation nach x Gl. (2.3):

$$S'(x + y) = S'(x) \cdot S(y) \quad (2.3)$$

Division von (2.3) durch (2.2) liefert Gl. (2.4):

$$\frac{S'(x + y)}{S(x + y)} = \frac{S'(x)}{S(x)} \quad (2.4)$$

Gl. (2.4) muss für beliebige Gebiete gültig sein, weshalb Gl. (2.5) gilt:

$$\frac{S'(x)}{S(x)} = \text{konstant} \quad (2.5)$$

Da die Versagenswahrscheinlichkeit eines Teilelementes bei beliebig hoher Belastung in einem Gebiet mit der Fläche 0 mm^2 100 % beträgt, also $S(0)=1$ ist, folgt Gl. (2.6):

$$S(x) = e^{-m \cdot x} \quad \text{mit } m = \text{konstant, } m > 0 \quad (2.6)$$

Gl. (2.6) drückt die Versagenswahrscheinlichkeit $S(x)$ der Quantität x aus, die beliebig gewählt werden kann. Die Überlebenswahrscheinlichkeit der Quantität x ist in Gl. (2.7) gegeben:

$$1 - S(x) = 1 - e^{-m \cdot x} \quad \text{mit } m = \text{konstant, } m > 0. \quad (2.7)$$

Man betrachte ein Volumen dV mit beliebig vielen, gleich großen Teilelementen, deren Festigkeitsverteilung bekannt ist. Die Versagenswahrscheinlichkeit S_0 der einzelnen Teilelemente des Volumens dV

ist für eine vorgegebene, materialabhängige Spannungsfunktion $t(\sigma)$ ebenfalls bekannt. Für diese Funktion $t(\sigma)$ wird ein für Baustoffe üblicher exponentieller Ansatz gewählt, der eine Mindestfestigkeit σ_u und damit eine untere Schranke der Festigkeit besitzt:

$$t(\sigma) = \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_m} \right)^p \quad \text{mit} \quad \sigma \geq \sigma_u \quad (2.8)$$

Bei infinitesimal kleinen Volumeneinheiten dV ergibt sich durch Einsetzen von Gl. (2.8) in Gl. (2.7) die Verteilungsfunktion $F(\sigma)$ der Versagenswahrscheinlichkeiten eines Bauteils (Gl. (2.9)):

$$F(\sigma) = 1 - e^{-\int_V \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_m} \right)^p dV} \quad \text{mit} \quad \begin{array}{ll} p & \text{Formparameter} \\ \sigma & \text{Bruchspannung in N/mm}^2 \\ \sigma_u & \text{Materialmindestfestigkeit bzw. Ortsparameter in N/mm}^2 \\ \sigma_m & \text{Maßstabsparameter in N/mm}^2 \end{array} \quad (2.9)$$

Unter der Annahme eines konstanten Bauteilvolumens über die Länge und einer konstanten Spannungsverteilung über den Querschnitt lässt sich Gl. (2.9) vereinfachen:

$$F(\sigma) = 1 - e^{-V \cdot \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_m} \right)^p} \quad (2.10)$$

Gl. (2.10) stellt die grundlegende Formel der WEIBULL-Theorie dar. Die Verteilungsfunktion $F(\sigma)$ wird als WEIBULL-Funktion bezeichnet und unterliegt einem Volumeneinfluss. Wird unabhängig vom Bauteilvolumen eine identische Verteilung der Festigkeiten bei den einzelnen Teilelementen angenommen, sind die Verteilungsparameter σ_u , σ_m und p Materialkonstanten. Werden die Verteilungsfunktionen zweier Prüfkörperkollektive mit unterschiedlichen, aber kollektivweise konstanten Holzabmessungen verglichen, kann über Gl. (2.10) ein Einfluss der Abmessungen auf die Festigkeit der Prüfkörper abgeleitet werden, wenn angenommen wird, dass die Versagenswahrscheinlichkeiten beider Prüfkörper gleich groß sind (Gl. (2.11)):

$$\left. \begin{array}{l} S_1 = 1 - e^{-V_1 \cdot \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_u}{\sigma_m} \right)^p} \\ S_2 = 1 - e^{-V_2 \cdot \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_u}{\sigma_m} \right)^p} \end{array} \right\} S_1 = S_2 \Rightarrow 1 - e^{-V_1 \cdot \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_u}{\sigma_m} \right)^p} = 1 - e^{-V_2 \cdot \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_u}{\sigma_m} \right)^p}$$

$$\Leftrightarrow \frac{\sigma_1 - \sigma_u}{\sigma_2 - \sigma_u} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{1/p}$$

$$\Leftrightarrow \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{1/p} + \frac{\sigma_u}{\sigma_2} \cdot \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{1/p} \right) \quad (2.11)$$

Bei einer zweiparametrischen WEIBULL-Verteilung wird die Materialmindestfestigkeit zu $\sigma_u = 0$ gesetzt und Gl. (2.11) kann weiter vereinfacht werden (Gl. (2.12)):

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{1/p} = \left(\frac{b_2 \cdot h_2 \cdot s_2}{b_1 \cdot h_1 \cdot s_1} \right)^{1/p} \quad (2.12)$$

Gl. (2.12) zeigt die elementare Gleichung zur Berücksichtigung des Größeneffektes bei Schnittholz, die bisher in den meisten Untersuchungen verwendet wird.

Wird die Sprödbbruchtheorie zur Erklärung des Größeneffektes angewandt, sind wesentliche Annahmen, die der Herleitung der Festigkeitsfunktion zugrunde liegen, zu beachten. Die Grundvoraussetzungen zur Anwendung der Sprödbbruchtheorie sind:

- sprödes Materialverhalten;
- isotrope Materialeigenschaften, d.h. die Versagenswahrscheinlichkeit des Materials ist in jede Richtung gleich;
- reguläres Material, d.h. alle Elemente erreichen zur gleichen Zeit ihre Festigkeit, die Rissfortpflanzung kann ungehindert stattfinden;
- die Teilelemente müssen in Bezug auf ihr Festigkeitsverhalten statistisch unabhängig sein;
- Gl. (2.10) kann nur erzeugt werden, wenn eine konstante Spannungsverteilung über den Querschnitt vorliegt.

Die Anwendbarkeit der WEIBULL-Theorie auf Holz unter Biegebeanspruchung ist bis heute umstritten, weil Holz unter Biegebeanspruchung die genannten Voraussetzungen nicht erfüllt:

- Das Materialversagen bei Biegung ist nicht rein spröde. Duktile Brüche mit einer Ausbildung von Druckfalten auf der druckbeanspruchten Seite des Prüfkörpers können ebenso gut vorkommen wie eine Mischung aus duktilem und sprödem Versagen (Abb. 2.4).
- Holz besitzt eine stark anisotrope Struktur. Parallel zur Faser weist der Werkstoff völlig andere Eigenschaften als rechtwinklig dazu auf. Um der Anisotropie gerecht zu werden, entwickelten MADSEN & BUCHANAN (1986) den theoretischen Größeneffekt nach WEIBULL weiter und unterteilten den Volumeneffekt in einen Breiten-, einen Höhen- und einen Längeneffekt (BURGER 1998):

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left(\frac{b_2 \cdot h_2 \cdot s_2}{b_1 \cdot h_1 \cdot s_1} \right)^{1/p} \cong \left(\frac{b_2}{b_1} \right)^{b_0} \cdot \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{h_0} \cdot \left(\frac{s_2}{s_1} \right)^{s_0} \quad (2.13)$$

Die Umformung nach Gl. (2.13) ist mathematisch nur exakt, wenn $b_0 = h_0 = s_0 = 1/p$ gilt.

- Die WEIBULL-Theorie entspricht einer so genannten Worst-Case-Theorie, da nach der Theorie der Bruch schlagartig mit dem Versagen des ersten Teilelementes eintritt. Das Modell kann weder Spannungsumlagerungen noch eine Wiederverfestigung des Materials nach dem ersten Anreißen der Fasern berücksichtigen, die beim Baustoff Holz aber vorkommen.
- Ein weiteres Problem stellt die Annahme der statistischen Unabhängigkeit der Teilelemente dar. Die Autokorrelation der Holzeigenschaften innerhalb eines Bauteils wird nicht berücksichtigt. Es wird eine gleichmäßige Verteilung der Querschnittsschwächungen über das Volumen unterstellt, die nicht zutrifft (BECHTEL 1988, ISAKSSON & THELANDERSSON 1995). Für sortiertes Bauholz kann die statistische Unabhängigkeit der Fehlerereignisse nicht unterstellt werden, da durch die Sortierung ein Zusammenhang zwischen Sortierklasse und Volumen hergestellt wird.
- Die Voraussetzung des konstanten Spannungsverlaufes zur Erzeugung von Gl. (2.10) ist bei Biegung ebenfalls nicht gegeben. Die Spannungsnulllinie wandert während der Belastungssteigerung immer weiter in den Zugbereich, weil sich die Druckzone duktil ausbeult (Abb. 2.2). Die Spannungsverteilung beim Bruch ist bei Biegebelastung weder linear noch konstant.

Trotz der genannten Einschränkungen dient die WEIBULL-Theorie vielen Forschern als Grundlage zur Herleitung eines Größeneffektes, da sie eine gute Anpassung an reale Versuchsdaten liefert (u.a. BOHANNAN 1966, BARRETT 1974, LAM & VAROGLU 1990, JOHNSON ET AL. 1989, MADSEN 1992). Andere Autoren sehen die Anwendung der WEIBULL-Theorie auf das Material Holz als kritisch an und suchen nach weiteren Modellansätzen, die weniger Widersprüchlichkeiten zwischen Theorie und Versagensart aufweisen (MISTLER 1982, KÄLLSNER ET AL. 1997 a,b).

2.3.3 Das Seil-Ketten-Modell von MISTLER

MISTLER (1979) entwickelt ein Modell, das im Gegensatz zur WEIBULL-Theorie auch Spannungsumlagerungen im Querschnitt zulässt. Dabei wird der Prüfkörperquerschnitt in einzelne Drähte zerlegt, die gedanklich zu einem Seil zusammengefasst werden können. Das Seil versagt nicht, wenn ein Draht oder mehrere Drähte versagen, sondern erst dann, wenn die verbleibenden Drähte nicht mehr in der Lage sind, die Beanspruchung zu übertragen. Ein Größeneffekt ergibt sich aus der mit der Querschnittsgröße ansteigenden Anzahl an Drähten. Die Einzeldrähte werden in Längsrichtung entsprechend WEIBULL als Kette aufgefasst und versagen, wenn das schwächste Kettenglied versagt.

Das Modell wird anhand von Quersugsversuchen mit Prüfkörpern unterschiedlicher Abmessungen überprüft. Mit zunehmenden Abmessungen nimmt bei den Versuchen der Mittelwert der Festigkeit zu und der Variationskoeffizient ab, was durch das Seil-Ketten-Modell abgebildet werden kann. Im Vergleich zum Größeneffekt nach WEIBULL lassen sich die im Versuch ermittelten Festigkeiten genauer erfassen sowie Rissfortschrittsprobleme behandeln. MISTLER selbst kritisiert am Seil-Ketten-Modell, dass die volle Umlagerungsmöglichkeit der Belastung innerhalb der gesamten Querschnittsfläche vorausgesetzt wird, diese aber nicht immer gegeben ist. Außerdem können mit dem Modell keine inneren

Zwängungsspannungen durch die Holz Trocknung berücksichtigt werden, die sicherlich auftreten und ebenfalls querschnittsabhängig sind.

2.3.4 Bruchmechanische Modelle

Die Bruchmechanik liefert einen anderen Ansatz zur Erläuterung des Größeneffektes bei Holz. Sie geht davon aus, dass ein Versagen durch die Ausbreitung einer makroskopischen Fehlstelle (Diskontinuität, Riss, sonstige Fehlstellen) über das Prüfkörpervolumen eingeleitet wird.

In der Bruchmechanik wird zwischen drei Versagensmechanismen (Bruchmodi) unterschieden (PATTON-MALLORY & CRAMER 1987). Im Bruchmodus I versagt der Werkstoff durch Auseinanderreißen bei gleichzeitiger Rissöffnung, im Bruchmodus II durch Abscheren in Längsrichtung, im Bruchmodus III durch Abscheren rechtwinklig zur Längsrichtung (Abb. 2.5).

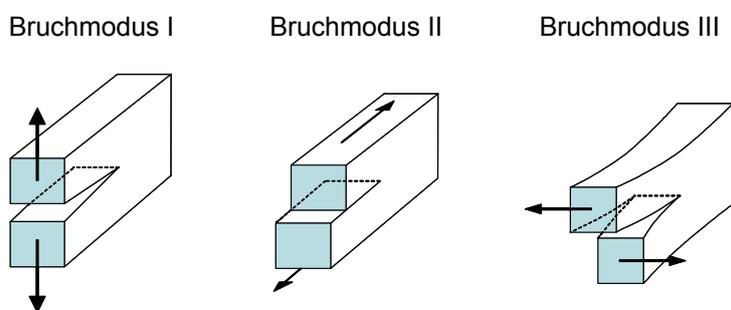


Abb. 2.5: Versagensmechanismen in der Bruchmechanik.

Für den Werkstoff Holz müssen nur Bruchmodus I und II betrachtet werden, da der Bruchmodus III nicht oder nur sehr selten eintritt. Bruchmechanische Kenngrößen sind so genannte Spannungsintensitätsfaktoren (K_I und K_{II}), die je nach Bruchmodus unterschiedlich sind und die Stärke des Spannungsabfalls in der Nähe der Risspitze beschreiben. Spannungsintensitätsfaktoren beim Versagen werden als Bruchzähigkeiten bezeichnet (K_{IC} und K_{IIC}) und sind Materialkonstanten. Für Holz sind die Bruchzähigkeiten neben dem Bruchmodus z.B. von der Holzart und von den Holzeigenschaften abhängig. Versagen tritt ein, wenn das Risswachstum nicht gestoppt werden kann, das heißt, wenn für einen der beiden Bruchmodi der Spannungsintensitätsfaktor an der Risspitze gleich der Bruchzähigkeit ist. Treten beim Versagen die Bruchmodi I und II kombiniert auf, gilt die Formel von Wu (1967) als Versagenskriterium (PATTON-MALLORY & CRAMER 1987):

$$\frac{K_I}{K_{IC}} + \left(\frac{K_{II}}{K_{IIC}} \right)^2 = 1 \quad (2.14)$$

AICHER & REINHARDT (1993) untersuchen den Größeneffekt im Bruchmodus I mit Hilfe der linear-elastischen Bruchmechanik und belasten dazu zwei geometrisch ähnliche Körper mit Kerbe auf Zug. Über Gleichgewichtsbedingungen lassen sich Gl. (2.15) in allgemeiner Form und über die Versuchsergebnisse von AICHER & REINHARDT (1993) der Exponent mit $p = 2$ festlegen:

$$\frac{\sigma_{N2}}{\sigma_{N1}} = \left(\frac{d_1}{d_n} \right)^{1/p} \quad \text{mit } p = 2 \quad (2.15)$$

Gl. (2.15) entspricht formal der Spröbruchtheorie nach WEIBULL (1939 a,b) und gibt das Maßstabsgesetz der linear-elastischen Bruchmechanik an. Neben den bereits zitierten Literaturstellen beschäftigten sich u.a. BOATRIGT & GARRETT 1983, BARRETT & FOSCHI 1978, BOSTRÖM 1990, CRAMER & McDONALD 1989, BAŽANT ET AL. 1991 und AICHER ET AL. 1993 damit, den Größeneffekt über die Bruchmechanik zu erklären.

2.3.5 Das „Schwachzonenmodell“ von KÄLLSNER ET AL.

KÄLLSNER ET AL. (1997 a,b) entwickeln ein so genanntes „Schwachzonenmodell“, mit dem die Biegefestigkeit von Fichtenholz vorhergesagt werden kann. Das Modell berücksichtigt die Anzahl, Lage und Größe der Schwachstellen in einem Träger. Dies führt ebenfalls zu einer Festigkeitsabnahme mit zunehmender Trägerlänge. Lange Träger speichern im Biegeversuch kurz vor dem Versagen eine große elastische Energie, die beim Eintreten des Bruchs zu einem schlagartigen Versagen führt. Bei hoher Energiespeicherung ist das erste lokale Spannungsmaximum an einer Schwachstelle auch das erste globale Spannungsmaximum für den gesamten Träger. Liegen zwei Schwachstellen im Träger vor, teilt sich die gespeicherte Energie auf diese zwei Schwachstellen auf. Mit Zunahme der Bauteillänge ist eine größere Anzahl an Schwachzonen zu erwarten, was zu einer Biegefestigkeitsminderung führt. Der Träger reißt beim Auftreten des ersten Anrisses schlagartig durch, wodurch keine weitere Laststeigerung ermöglicht wird. Bei weggesteuerter Prüfung ist zu beachten, dass Kraftmaxima und Durchbiegungsmaxima nicht gekoppelt sein müssen. Bei einer größeren Schwachstellenanzahl wird erwartet, dass bei gleicher Kraft die Durchbiegung ebenfalls größer ist. Vergleiche mit den Ergebnissen von ISAKSSON (1996) zeigen ähnliche Längeneffekte wie im Versuch ermittelt. Die Autoren erklären, dass das Schwachzonenmodell 5 % bis 15 % höhere Festigkeiten vorhersagt als beim Versuch ermittelt werden, was von den Autoren auf einen statistischen Effekt und auf die Bruchenergie beim schlagartigen Versagen zurückgeführt wird.

Schon die Vielzahl an Ansätzen und Theorien zum Größeneffekt weisen darauf hin, dass der Größeneffekt sehr komplexen Zusammenhängen unterliegen muss. Die nachfolgend dargestellten, in der Literatur genannten Versuchsergebnisse sind genau so vielfältig und teilweise widersprüchlich.

2.4 Der Größeneffekt bei ast- und fehlerfreien Prüfkörpern

Anfang des 20. Jahrhunderts werden im Hinblick auf den Fahrzeug- und Flugzeugbau die Festigkeitseigenschaften von Holz an kleinen, ast- und fehlerfreien Prüfkörpern untersucht. Als Prüfmethode diente üblicherweise der 3-Punkt-Biegeversuch, da diese Prüfkörper nahezu konstante Eigenschaften über die Prüfkörperlänge aufweisen und es deshalb ausreicht, einen Punkt des Prüfkörpers maximal zu belasten, um dessen Festigkeit zu ermitteln. Tab. A.1 im Anhang fasst die Versuche zum Größeneffekt an kleinen, ast- und fehlerfreien Prüfkörpern zusammen, Tab. A.2 und Abb. 2.6 geben die ermittelten Höhenfaktoren an.

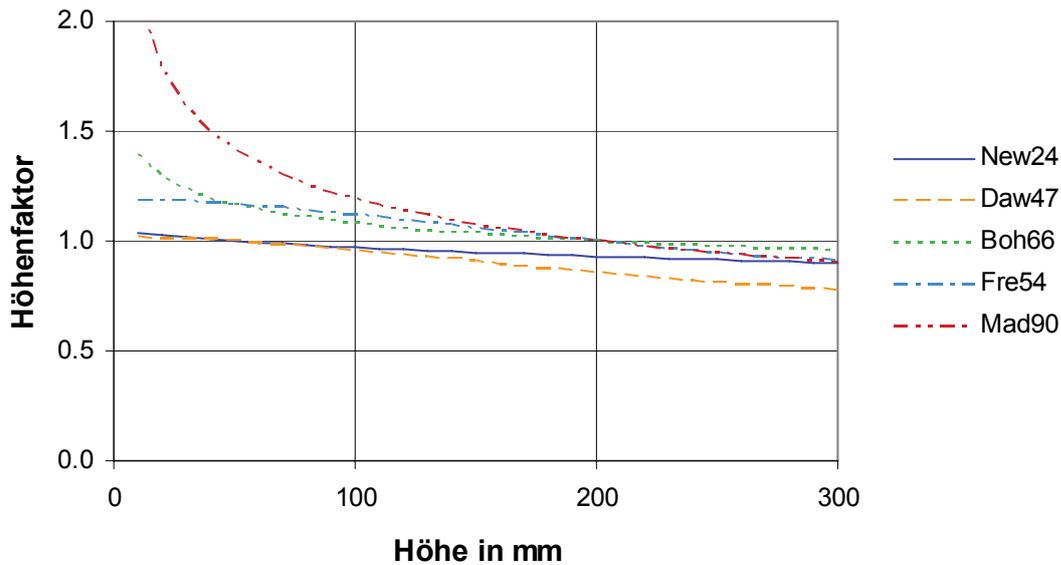


Abb. 2.6: Vergleich der Höhenfaktoren von NEWLIN & TRAYER (1924) (BOHANNAN 1966), DAWLEY & YOUNGQUIST (1947) (BOHANNAN 1966), FREAS & SELBO (1954) (FEWELL & CURRY 1983), BOHANNAN (1966) und MADSEN (1990 b).

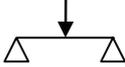
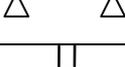
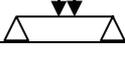
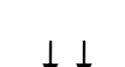
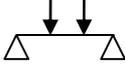
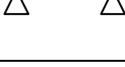
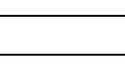
Ursprünglich wird der Größeneinfluss vorwiegend auf die Höhe des Prüfkörpers zurückgeführt: TANAKA beschreibt bereits 1906 einen Einfluss der Querschnittshöhe auf die Biegefestigkeit und unterstellt dabei eine Abhängigkeit von der Holzart (YLINEN 1942). CLINE & HEIM weisen 1912 ebenfalls eine signifikante Abnahme der Biegefestigkeit mit zunehmender Querschnittsbreite und -höhe nach (BUCHANAN 1983). 1919 führt MONNIN die Untersuchungen von TANAKA weiter und zeigt, dass der Größeneffekt nicht von der Holzart, sondern von der Holzqualität abhängt (YLINEN 1942). MONNIN gibt unterschiedliche Größeneffekte für Holz für den Flugzeug- und Wagenbau, handelsübliches Bauholz und sehr astiges Abfallholz an (Tab. A.2). Die Erklärungsversuche zum Einfluss der Querschnittshöhe auf die Biegefestigkeit sind Anfang des 20. Jahrhunderts vielfältig. NEWLIN & TRAYER (1924) entwickeln die Faserunterstützungstheorie (Kap. 2.3.1). YLINEN führt 1942 die Biegefestigkeitsabnahme mit zunehmender Querschnittshöhe auf eine Zunahme der Schwankungen im Spätholzanteil und in der Holzfeuchte zurück. Er differenziert den Größeneffekt zum ersten Mal in einen Einfluss der Breite und einen Einfluss der Höhe, stellt aber fest, dass der Einfluss der Breite gering ist. Auch DAWLEY & YOUNGQUIST (1947) (BOHANNAN 1966) und FREAS & SELBO (1954) (FEWELL & CURRY 1983) beziehen die Abnahme der Biegefestigkeit von kleinen, fehlerfreien Prüfkörpern auf einen Einfluss der Querschnittshöhe. FREAS & SELBO veröffentlichen 1954 eine Gleichung zur Umrechnung der Biegefestigkeit auf eine Referenzhöhe von 50 mm, die angepasst auf eine Querschnittshöhe von 300 mm Eingang in die nordamerikanische Normung und 1967 in den britischen „Code of Practice for structural use of timber“ findet (FEWELL & CURRY 1983). In Tab. A.2 ist die Gleichung für eine Referenzhöhe von 200 mm angegeben. FREAS & SELBO führen den Größeneffekt aufgrund der Faserunterstützungstheorie von NEWLIN & TRAYER (1924) auf den druckbeanspruchten Bereich des Biegeprüfkörpers zurück (MADSEN 1992): Außen liegende, druckbeanspruchte Fasern werden von weniger stark druckbeanspruchten Fasern in der Nähe der neutralen Achse eines

Querschnitts unterstützt, wodurch die Festigkeit erhöht wird. Die Festigkeitserhöhung ist umso größer, je kleiner die Prüfkörperhöhe ist, weil mit größerem Spannungsgradienten die Faserunterstützung stärker wirksam wird (Kap. 2.3.1).

Die zunehmende Prüfung von Schnittholz in Gebrauchsabmessungen ab den 50-er Jahren führt zu einer veränderten Prüfanordnung, der so genannten 4-Punkt-Biegeprüfung. Mit dieser Prüfanordnung untersucht COMBEN 1957 den Einfluss der Länge und der Höhe auf die Biegefestigkeit von ast- und fehlerfreier Douglasie. Leider variiert COMBEN Prüfkörperlänge und Querschnittshöhe gleichzeitig, so dass ein kombinierter Größeneffekt erzeugt wird. Dies versucht SCHNEEWEIß 1964 zu verhindern und variiert bei Biegeversuchen an den Holzarten Fichte und Eiche neben der Belastungsart nur den Auflagerabstand. Allerdings ist der Versuchsumfang mit teilweise nur 2 Prüfkörpern pro Kollektiv so gering, dass keine allgemeingültigen Aussagen aus dieser Veröffentlichung abgeleitet werden können.

Die erste systematische Untersuchung des Größeneffektes führt BOHANNAN 1966 anhand fehlerfreier Douglasienproben durch. Da viele neuere Literaturstellen auf BOHANNAN`s Ergebnissen aufbauen, wird auf diese Veröffentlichung näher eingegangen: Insgesamt wurden 3 Kollektive im 3-Punkt-Biegeversuch und 5 Kollektive im 4-Punkt-Biegeversuch geprüft (Tab. 2.1). Die Biegefestigkeit der Proben wurde auf eine einheitliche Dichte von $\rho = 480 \text{ kg/m}^3$ umgerechnet, um einen eventuell vorhandenen Dichteinfluss nicht mit dem Größeneffekt zu überlagern.

Tab. 2.1: Versuchsumfang von BOHANNAN (1966).

Kollektiv	n	b mm	h mm	s mm	$f_{m,mean}$ N/mm ²	Belastungsart
-	-					-
A	343	25	25	356	91.4	
B	210	25	25	457	92.1	
C	1418	51	51	711	85.0	
D	85	132	305	4115	65.6	
F	34	25	25	533	83.4	
G	42	152	25	533	83.4	
H	43	70	15	324	85.5	
I	28	25	25	762	80.7	

Anmerkung: Abkürzungen siehe Abkürzungsverzeichnis S. xvii - xviii

BOHANNAN führt den Größeneffekt auf die WEIBULL-Theorie zurück (Kap. 2.3.2). Aufgrund der Versuchsergebnisse der Kollektive F und G folgert BOHANNAN, dass der Einfluss der Querschnittsbreite auf die Biegefestigkeit vernachlässigbar gering ist. Er unterstellt nur einen Einfluss der Querschnittshöhe und beschreibt die Abnahme der Biegefestigkeit mit zunehmender Querschnittshöhe mit dem Ansatz von WEIBULL (Gl. (2.16), Tab. A.2 und Abb. 2.6):

$$f_m(h = 200 \text{ mm}) = \frac{f_m(h)}{\left(\frac{200}{h}\right)^{0.11}} \quad (2.16)$$

Nach 1966 wird der Größeneffekt vermehrt untersucht, wobei der Anteil an Bauholzuntersuchungen kontinuierlich zu- und der Anteil an Untersuchungen von ast- und fehlerfreien Prüfkörpern kontinuierlich abnimmt. Zunehmend werden auch andere Prüfarten wie Zug (KUNESH & JOHNSON 1974) oder Druck (MALHOTRA & BAZAN 1980) in Zusammenhang mit dem Größeneffekt untersucht. BUCHANAN vergleicht 1983 die unterschiedlichen Größeneffekte für Zug und Biegung. Er stellt fest, dass der Einfluss der Länge für beide Prüfarten identisch ist, dass aber der Einfluss der größeren Querschnittsabmessung auf die Zugfestigkeit den Einfluss der Höhe auf die Biegefestigkeit deutlich übersteigt. Zur Begründung werden zwei alternative Überlegungen angestellt: Entweder beeinflussen unterschiedliche, prüfartspezifische Versagensmechanismen den Größeneffekt oder Holzfehler wie z.B. Faserabweichungen wirken sich auf die Zugfestigkeit und auf die Biegefestigkeit unterschiedlich aus.

Schließlich untersucht MADSEN (1990 b) den Einfluss der Feuchte und der Lastanordnung auf den Größeneffekt bei fehlerfreier Douglasie anhand quadratischer Querschnitte. Da sowohl ein Längeneffekt als auch ein Höheneffekt auftritt, befürwortet MADSEN den Ansatz eines Volumeneffektes anstatt eines reinen Höheneffektes und unterstützt damit die Forderung von SCHNEEWEIß, der bereits 1969 aufgrund von Versuchen mit veränderlicher Breite einen Volumeneffekt vorschlägt.

2.5 Der Größeneffekt bei Schnittholz

An Schnittholz wird der Größeneffekt erst ab den 70-er Jahren untersucht. Durch die signifikant größeren Abmessungen, verbunden mit zusätzlichen makroskopischen Einflüssen auf die Biegefestigkeit und die geänderte Prüfanordnung (4-Punkt-Biegeprüfung), verändern sich die Zusammenhänge zwischen den Holzabmessungen und der Biegefestigkeit. Äste und die mit den Ästen verbundenen Faserstörungen reduzieren die Biegefestigkeit deutlich. Unter Berücksichtigung dieser Einflüsse ergibt sich im Vergleich zu fehlerfreiem Material ein veränderter Größeneffekt. Tab. A.3, Tab. A.4 und Tab. A.5 im Anhang geben einen Überblick über die Literatur zum Größeneffekt bei Schnittholz sowie deren Ergebnisse, die im Weiteren zusammengefasst dargestellt werden.

Die wohl umfassendste Untersuchung zur Festigkeit von Schnittholz wird Ende der 70-er Jahre in Kanada (In-Grade-Programm) unter der wissenschaftlichen Leitung von MADSEN & NIELSEN durchgeführt (MADSEN & NIELSEN 1976, MADSEN & NIELSEN 1978 a,b,c, MADSEN 1978 a,b): Sie ermitteln an über 12.000 Prüfkörpern der Holzarten Spruce-Pine-Fir, Hem-Fir und Douglas-Fir-Larch mit den Querschnittsgrößen 38x89 mm², 38x140 mm², 38x184 mm² und 38x235 mm² deren Biege-, Zug- und Druckfestigkeit. Die Hölzer werden nur einer Probelastung ausgesetzt, bei der ca. 10 % aller Proben versagen, so dass eine gesicherte untere Streugrenze der Festigkeit abgeleitet werden kann. Die Biegeversuche werden mit einem Stützweite-zu-Höhe-Verhältnis von $s/h = 17$ mit zufälliger Lage des kritischen Querschnitts im Prüfkörper geprüft. Zahlreiche Forscher werten diese Versuche auch im Hinblick auf die Größeneffekte

unterschiedlich aus (Tab. A.4 und Tab. A.5). Dieses Beispiel macht den Prüfaufwand und die damit verbundenen Probleme bei der Ermittlung des Größeneffektes deutlich.

Die Frage, welche Holzabmessung oder welche Kombination von Holzabmessungen die Biegefestigkeit beeinflusst, wird in der Literatur widersprüchlich diskutiert. Die Biegefestigkeit wird bei einem konstanten Verhältnis von Stützweite zu Querschnittshöhe ermittelt, da diese beiden Größen auch in der praktischen Verwendung nicht voneinander unabhängig sind und die Prüfnormen ein definiertes Verhältnis von Stützweite zu Querschnittshöhe vorschreiben. Im europäischen Raum und in Australien liegt das Verhältnis von Stützweite zu Querschnittshöhe bei $s/h = 18$, während in USA und Kanada das Verhältnis zwischen $s/h = 17$ und $s/h = 21$ variiert (Tab. 2.3). Wird der Größeneffekt bei Schnittholz mit konstantem Stützweite-zu-Höhe-Verhältnis untersucht (u.a. MADSEN & NIELSEN 1976, GLOS & HENRICI 1993, ROUGER ET AL. 1993), kann nicht zwischen dem Einfluss der Querschnittshöhe und dem Einfluss der Stützweite unterschieden werden. Je nach Autor wird der Komplex aus Höhen- und Längeneffekt auf einen reinen Höheneffekt (z.B. MADSEN 1978 a), auf einen reinen Längeneffekt (z.B. MADSEN & BUCHANAN 1985, MADSEN 1992) oder auf zwei getrennt voneinander zu beachtende Größeneffekte (z.B. FEWELL & GLOS 1988, BARRETT & GRIFFIN 1989, MADSEN 1990 a, BARRETT ET AL. 1992, GALLIGAN ET AL. 1993) zurückgeführt. Die Trennung des Höhen- und Längeneffektes kann aber auch durch die Prüfanordnung erfolgen: So untersuchen JOHNSON ET AL. (1989) nur den Höheneffekt, sind aber der Meinung, dass zusätzlich zum Höheneffekt ein Längeneffekt existiert. LAM & VAROGLU ermitteln 1990 durch Prüfung des Querschnitts $38 \times 89 \text{ mm}^2$ in drei unterschiedlichen Längen einen reinen Längeneffekt. ISAAKSON & THELANDERSSON wiederum finden 1995 bei norwegischer Fichte keinen signifikanten Einfluss der Länge auf die Biegefestigkeit. Sie definierten aufgrund der Ästigkeit mehrere Schwachstellen innerhalb jedes Prüfkörpers und ermittelten für jede Schwachstelle die Biegefestigkeit. Ergebnis der Untersuchung ist, dass die Biegefestigkeit der Schwachstellen innerhalb eines Prüfkörpers nur wenig variiert und deshalb kein Längeneffekt entsteht. Die Biegefestigkeitswerte unterscheiden sich beim Vergleich verschiedener Prüfkörper wesentlich stärker. Auch KÄLLSNER ET AL. (1997 a,b) und KÄLLSNER & DITLEVSEN (1997) geben zu bedenken, dass der Längeneffekt ein rein statistischer Effekt sein könnte (Kap. 2.3.5).

Nach BOHANNAN's Veröffentlichung 1966 wird die Querschnittsbreite bei der Ermittlung des Größeneffektes häufig vernachlässigt. MADSEN & STINSON untersuchen 1982 noch einmal gezielt den Breiten-effekt und erhalten eine Zunahme der charakteristischen Festigkeit mit zunehmender Breite, was der Erwartung der Autoren nicht entspricht und der WEIBULL-Theorie entgegensteht. Auch MARCHAND & FUX (1983) ermitteln auf dem Niveau des 5%-Quantils eine Zunahme der charakteristischen Festigkeit mit zunehmender Querschnittsbreite und -höhe, wobei sie Querschnittshöhe und -breite gleichzeitig veränderten. MADSEN findet bei der Auswertung von Versuchsergebnissen der University of British Columbia in Vancouver von 1976 bei zwei von drei Versuchskollektiven mit zunehmender Querschnittshöhe ebenfalls eine Zunahme der Biegefestigkeit (MADSEN 1992). ROUGER ET AL. (1993) weisen eine starke Zunahme der Festigkeit mit zunehmender Querschnittshöhe für visuell hochwertige Hölzer der Holzarten Fichte/Tanne, Douglasie und Pinie nach (Tab. A.5).

Neben der Frage, welche Holzabmessung die Biegefestigkeit beeinflusst und welche nicht, ist die Größe des Einflusses ausschlaggebend. Tab. A.5 gibt einen Überblick über die in der Literatur angegebenen Größenexponenten bei Schnittholz. Da die Autoren teilweise zwischen einem Größeneffekt auf dem Niveau des Mittelwertes und einem Größeneffekt auf dem Niveau des 5%-Quantils unterscheiden, wird diese Unterscheidung in Tab. A.5 eingeführt. Liegen keine Informationen über das Festigkeitsniveau vor, auf das sich der Größenexponent bezieht, ist der entsprechende Wert mittig eingetragen. Die immense Streubreite sowie die Unterschiede der Exponenten lassen die Schwierigkeiten bei der Ermittlung der Größeneffekte erahnen.

Die Frage, in welchem Umfang der Größeneffekt von den Holzmerkmalen und damit auch von der Sortierung abhängt, ist bis heute nicht eindeutig geklärt. Zahlreiche Autoren sind der Meinung, dass der Größeneffekt auch von der Schnittholzqualität abhängt und damit von den Wechselwirkungen mit typischen Strukturmerkmalen (Größe und Verteilung der Äste, Variation der Festigkeitseigenschaften über den Stammquerschnitt und die Stammhöhe in Verbindung mit dem Einschnittmuster) überlagert wird (BARRETT 1974, CURRY & TORY 1976, MADSEN & NIELSEN 1978 b, GLOS 1981, MARCHAND & FUX 1983, MADSEN & BUCHANAN 1985, LAM & VAROGLU 1990, MADSEN 1992, GLOS & HENRICI 1993, ROUGER & FEWELL 1994). Nach CURRY & FEWELL (1981) muss bei der Definition der Materialgüte auch das Sortierverfahren berücksichtigt werden, da sie bei der visuellen Sortierung einen starken Zusammenhang zwischen Sortierklasse und dem Größeneffekt finden konnten, der bei der maschinellen Sortierung nicht nachzuweisen war (GLOS 1981). Zwei Jahre später geben FEWELL & CURRY allerdings einen Höheneffekt unabhängig von der Sortierklasse an. GALLIGAN ET AL. weisen 1993 für maschinell sortiertes Schnittholz einen Längeneffekt nach, der nach ihrer Meinung von der Sortierklasse abhängt. Im gleichen Jahr zeigen ROUGER ET AL., dass der Größeneffekt sehr stark von der Sortiermethode abhängig ist, durch eine geeignete visuelle Sortierung gänzlich verschwinden kann und dass die Art der Sortierung sowie die jeweilige Holzqualität bei der Angabe von Größenfaktoren berücksichtigt werden müssen. Die Holzeigenschaften bestimmen den Versagensmechanismus und können damit den Größeneffekt beeinflussen (ROUGER & FEWELL 1994). Die europäischen Sortierregeln ordnen Bauholz nur nach dessen Festigkeit ein, während die US-amerikanische/kanadische und die australische/neuseeländische Normung Schnittholz auch aufgrund seines Erscheinungsbildes abstuft (BARRETT & LAM 1994, Tab. 2.3). Dies führt bei der US-amerikanischen/kanadischen und der australischen/neuseeländischen Schnittholzsortierung dazu, dass auch höherwertige Schnitthölzer aufgrund des Erscheinungsbildes in eine niedrige Sortierklasse eingestuft werden. Durch die veränderte Zusammensetzung der Sortierklasse werden die charakteristischen Kennwerte der Sortierklasse tendenziell erhöht. Auch diese Zusammenhänge können unterschiedliche Größeneffekte in den entsprechenden Ländern hervorrufen.

Ein weiterer, sowohl die Biegefestigkeit selbst als auch den Zusammenhang zwischen Größeneffekt und Biegefestigkeit beeinflussender Faktor ist die Prüfanordnung (BARRETT & LAM 1994). Hier ist in erster Linie die Lage des kritischen Querschnitts bei der Biegeprüfung entscheidend. Während im europäischen Raum der kritische Querschnitt des Holzes in der Regel zwischen den Lastangriffspunkten angeordnet wird, wird in Kanada, USA und Australien/Neuseeland der kritische Querschnitt üblicherweise beliebig angeordnet (Tab. 2.3). LAM & VAROGLU (1990) sind der Meinung, dass durch Anordnung des größten

Fehlers innerhalb der Kraftweite ein möglicher Längeneffekt von einem möglichen Einfluss der Sortierklasse separiert wird und ordnen deshalb den kritischen Querschnitt bewusst innerhalb der Kraftweite an. MADSEN (1991) ist sogar der Meinung, dass durch die bewusste Anordnung der Lage des größten Fehlers innerhalb der Kraftweite der Längeneffekt gänzlich unterdrückt wird.

Darüber hinaus ist fraglich, ob bei unterschiedlichen Beanspruchungsarten unterschiedliche Größeneffekte vorliegen. BUCHANAN (1986) und MADSEN (1992) sind der Meinung, dass die Beanspruchungsart und die damit verbundenen unterschiedlichen Versagensmechanismen den Größeneffekt beeinflussen. SHOWALTER weist 1986 einen Längeneffekt für Zug sowohl bei maschinell sortiertem als auch bei visuell sortiertem Material nach, kann aber nur für das visuell sortierte Material einen Höheneffekt finden (MADSEN 1990 a). BARRETT & FEWELL ermitteln dagegen 1990 identische Längeneffekte und identische Effekte der größeren Querschnittsabmessung für Biegung und Zug, wenn die Verhältnisse der Abmessungen (größere Querschnittsabmessung zu Länge) für beide Prüfarten identisch sind. BARRETT ET AL. (1992) geben ebenfalls vereinfachend gleiche Längen- und Höheneffekte für Biegung und Zug an, aber andere für Druck. Mit der Produktion von Brettschichtholz kommt die Frage auf, wie sich der Größeneffekt bei verleimten Trägern verhält: EHLBECK & COLLING (1987) lehnen aufgrund ihrer damaligen Versuchsergebnisse einen Höheneffekt bei Brettschichtholz ab, geben allerdings 1990 Längen- und Höhenfaktoren für Brettschichtholz an (EHLBECK & COLLING 1990). PETERSON weist 1993 einen Einfluss der Trägerhöhe auf die Biegefestigkeit von Douglasien-Brettschichtholz nach, wobei er offen lässt, ob dieser Einfluss auf den Größeneffekt oder auf andere Zusammenhänge zurückzuführen ist. AASHEIM & SOLLI (1995) sind der Meinung, dass der Größeneffekt bei Brettschichtholz ähnlich wie bei Vollholz abhängig ist von der Trägerhöhe, der Festigkeitsklasse, der Sortierung und der Prüfmethode.

2.6 Normative Regelungen

Im europäischen Raum sind in EN 338 Festigkeitsklassen mit charakteristischen Biegefestigkeitswerten aufgeführt. Die Ermittlung der charakteristischen Biegefestigkeitswerte ist in EN 384 geregelt, die sich auf die Prüfnorm EN 408 bezieht. In der deutschen Fassung der EN 384 ist der Größeneffekt derzeit in Abschnitt 5.3.4.3 geregelt (DIN EN 384:2004-05):

„Die 5%-Quantile der Biege- und Zugfestigkeit sind auf eine Höhe bzw. Breite von 150 mm umzurechnen, indem sie durch den Faktor k_h dividiert werden: $k_h = (150/h)^{0.2}$.

Stimmt die Biegeprüfanordnung nicht mit den Bedingungen nach EN 408 überein..., ist das 5%-Quantil der Biegefestigkeit umzurechnen, indem es durch den Faktor k_ℓ dividiert wird: $k_\ell = (\ell_{es}/\ell_{et})^{0.2}$ “.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Längenfaktor k_ℓ mit k_s bezeichnet. ℓ_{es} und ℓ_{et} sind formelmäßig identisch zu bestimmen: ℓ_{es} oder $\ell_{et} = s + 5 \cdot k$, wobei s und k für die Berechnung von ℓ_{es} die entsprechenden Werte für das genormte Prüfverfahren und für die Berechnung von ℓ_{et} die Werte der Prüfanordnung darstellen. Prüfbedingungen nach EN 408 bedeuten eine Stützweite von $s = 18 \cdot h$ bei einem Abstand der Lastangriffspunkte von $k = 6 \cdot h$.

Demzufolge werden die im Versuch ermittelten Festigkeitswerte von Querschnitten unter 150 mm Höhe reduziert und die im Versuch ermittelten Festigkeitswerte von Querschnitten über 150 mm Höhe erhöht (Abb. 2.7). Beim Einfluss der Länge auf die Biegefestigkeit werden die im Versuch ermittelten Festigkeitswerte für Stützweiten und Kraftweiten kleiner als $s + k = 18 \cdot h + 6 \cdot h$ reduziert und die im Versuch ermittelte Festigkeitswerte für Stützweiten und Kraftweiten größer als $s + k = 18 \cdot h + 6 \cdot h$ erhöht.

Nach EN 1995-1-1, Abschnitt 3.2 darf bei der Bemessung von Bauteilen der in EN 338 angegebene charakteristische Wert der Biegefestigkeit für Vollholz mit Rechteckquerschnitt und einer Querschnittshöhe kleiner als 150 mm folgendermaßen erhöht werden (Gl. (2.17)):

$$k_h = \min \left\{ \begin{array}{l} (150/h)^{0.2} \\ 1.3 \end{array} \right. \quad (2.17)$$

Die charakteristische Rohdichte des Vollholzes ist dabei auf $\rho_k \leq 700 \text{ kg/m}^3$ begrenzt. Für Querschnittshöhen größer $h = 150 \text{ mm}$ werden die charakteristischen Biegefestigkeitswerte nicht verändert, der Erhöhungsfaktor ist auf einen Maximalwert von $k_h = 1.3$ begrenzt. Abb. 2.7 zeigt die Höhenfaktoren nach EN 384 und EN 1995-1-1, Abb. 2.8 den Längenfaktor nach EN 384 graphisch.

Die deutsche Norm DIN 1052:2004-08 enthält derzeit keine Faktoren zur Berücksichtigung des Größeneffektes.

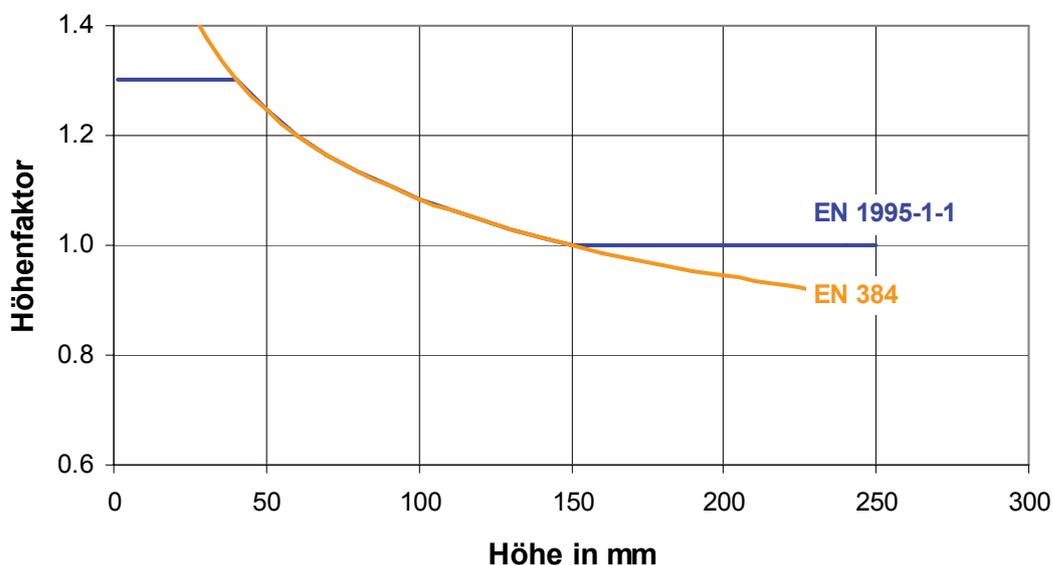


Abb. 2.7: Derzeitige Höhenfaktoren entsprechend EN 1995-1-1 und EN 384.

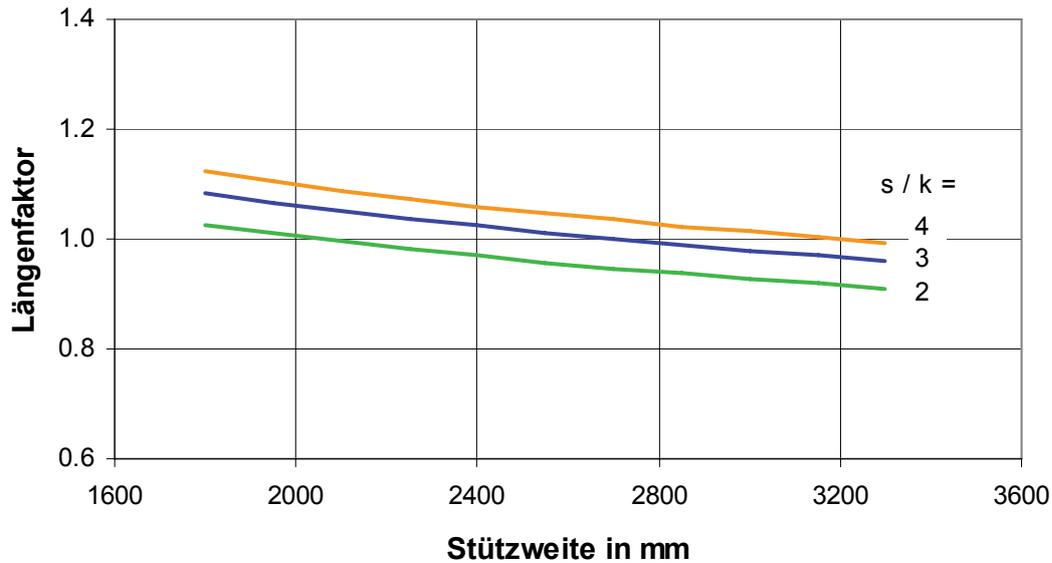


Abb. 2.8: Derzeitige Längenfaktoren entsprechend EN 384.

Nach der US-amerikanischen Norm ASTM D 1990 wird die Biegefestigkeit sowohl höhen- als auch längennormiert. Die im Versuch gemessene Kraft wird auf die nominalen Standardabmessungen 2" x 8" x 144" (38 x 184 x 3658 mm³) umgerechnet (Gl. (2.18)):

$$F_{(b,h,\ell)} = F_{(38 \times 184 \times 3658)} \cdot \underbrace{\left(\frac{38}{b}\right)^0}_{=1} \cdot \left(\frac{184}{h}\right)^{0.29} \cdot \left(\frac{3658}{\ell}\right)^{0.14} \quad (2.18)$$

Ein Breitenefekt wird vernachlässigt. Der Höheneffekt ist deutlich stärker als nach EN 384, wogegen der Längeneffekt geringer als in der europäischen Norm angenommen wird.

Die kanadische Norm CSA 086-01 differenziert den Größeneffekt für Biegung in Abhängigkeit von der Sortiervorschrift: Für visuell sortiertes Holz gelten die in Tab. 2.2 aufgeführten Werte, für maschinell sortiertes Holz wird generell kein Größeneffekt unterstellt.

Tab. 2.2: Größenfaktor für biegebeanspruchtes, visuell sortiertes Schnittholz mit Rechteckquerschnitt nach CSA 086-01 (Kanada).

kleinere Querschnittsabmessung mm	(nominell in inch)	größere Querschnittsabmessung		
		38 bis 64 mm (2 bis 3 inch)	89 bis 102 mm (4 inch)	114 mm und größer (5 inch und größer)
38	(2)	1.7	-	-
64	(3)	1.7	-	-
89	(4)	1.7	1.7	-
114	(5)	1.5	1.6	1.3
140	(6)	1.4	1.5	1.3
184 bis 191	(8)	1.2	1.3	1.3
235 bis 241	(10)	1.1	1.2	1.2
286 bis 292	(12)	1.0	1.1	1.1
337 bis 234	(14)	0.9	1.0	1.0
387 und größer	(>= 16)	0.8	0.9	0.9

Aus Kap. 2.5 ist bekannt, dass auch die Sortiervorschrift und die Prüfanordnung den Größeneffekt beeinflussen können. Tab. 2.3 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Sortierkriterien und Prüfanordnungen bei der Ermittlung der Biegefestigkeit in Europa, USA/Kanada und Australien/Neuseeland.

Tab. 2.3: Sortierkriterien und Prüfanordnung bei Ermittlung der Biegefestigkeit in Europa, USA/Kanada und Australien/Neuseeland (BARETT & LAM 1994).

	Europa	USA/Kanada	Australien/Neuseeland
Sortierkriterien	Festigkeit	Festigkeit & Erscheinungsbild	Festigkeit & Erscheinungsbild
Stützweite / Höhe	18	17-21	18
Lage des kritischen Querschnitts	zwischen den Lastangriffspunkten	beliebig	beliebig
Lage der größten Ästigkeit	beliebig (entweder auf der Biegezug- oder auf der Biegedruckseite)		

Im Folgenden werden die grundlegenden Zusammenhänge zwischen Holzabmessungen, Holzeigenschaften und Biegefestigkeit für die Holzart Fichte bestimmt und daraus ein mathematisches Modell entwickelt, das die Biegefestigkeit in Abhängigkeit aller relevanten Einflussfaktoren beschreibt.

3. Material und Methoden

3.1 Definitionen

Die Biegefestigkeit von Holz wird sowohl von den Holzabmessungen als auch von den Holzeigenschaften beeinflusst. Diese werden im Weiteren definiert und das zur Verfügung stehende Material sowie die Methoden beschrieben, mit denen die Biegefestigkeit, die Holzabmessungen und die Holzeigenschaften erfasst wurden.

Holzabmessungen sind die Querschnittsbreite b , die Querschnittshöhe h und die Prüfkörperlänge ℓ . Bei der Prüfkörperlänge muss je nach Prüfmethode zwischen der Stützweite s und der Kraftweite k differenziert werden. Die Definitionen der Abmessungen sind in Abb. 3.1 getrennt nach Prüfmethode dargestellt. Als Prüfarten werden im Rahmen dieser Arbeit Biegung hochkant (BH), Biegung flachkant (BF) und Zug (Z) unterschieden. Bei Biegung wird die Querschnittsabmessung rechtwinklig zur Krafteinleitung als Breite b , die Querschnittsabmessung parallel zur Krafteinleitung als Höhe h definiert. Bei Zug wird die kleinere Querschnittsabmessung als Breite b , die größere Querschnittsabmessung als Höhe h definiert.

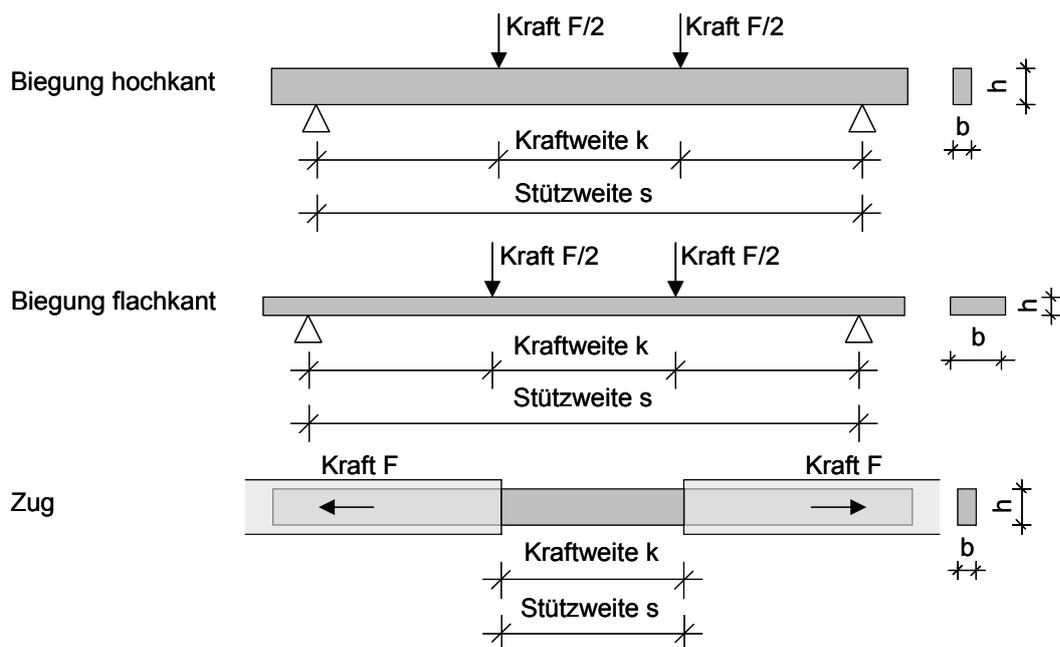


Abb. 3.1: Definition der Prüfkörperabmessungen in Bezug auf die Prüfmethode.

Zu den Holzeigenschaften im engen Sinne werden in dieser Arbeit die Holzmerkmale Ästigkeit, Darr-Rohdichte, Jahrringbreite und Druckholzanteil sowie die Holzfeuchte gezählt. Darüber hinaus werden die Parameter Markabstand, Jahrringlage und andere biologische Aspekte wie durch Wipfelbrüche verursachte Faserstörungen beurteilt. Diese werden im Rahmen der Holzeigenschaften als „weitere Einflussfaktoren“ geführt. Darunter fällt auch die Versagensart, die klären soll, in wie viel Prozent der Fälle ein sprödes Versagen bei der Biegeprüfung vorliegt und damit die WEIBULL-Theorie grundsätzlich anwendbar wäre.

3.2 Material

3.2.1 Aufarbeitung von vorhandenem Material

Diese Arbeit befasst sich mit dem Einfluss der Holzabmessungen auf die Biegefestigkeit mitteleuropäischer Fichte. Dafür wurden alle an der Holzforschung München verfügbaren, im Rahmen von Projekten ermittelten Versuchsdaten zusammengeführt, aufbereitet und auf Plausibilität geprüft. Nicht vorhandene Parameter wurden soweit möglich, z.B. anhand der vorliegenden Probestreifen, aufgenommen und ergänzt. Konnten nicht alle relevanten Parameter ergänzt werden, wurde der Prüfkörper nicht in die Auswertung einbezogen.

Insgesamt wurden Versuchsdaten aus 27 Projekten, im Weiteren als Kollektive bezeichnet, in diese Untersuchung einbezogen. Diese sind in Tab. A.6 nach Querschnittsabmessungen und Prüfmart getrennt aufgelistet. Tab. 3.1 zeigt einen Überblick über die Versuchsdaten, aufgeteilt nach Prüfmart und Querschnittsabmessungen, wobei die Querschnittsabmessungen zur besseren Übersichtlichkeit in Breiten- und Höhenkategorien gruppiert wurden. Die Streuungen der Abmessungen innerhalb der Teilbereiche können Abb. 3.2 entnommen werden.

Für die Untersuchungen der Zusammenhänge zwischen Holzabmessungen und Biegefestigkeit und der Zusammenhänge zwischen Holzeigenschaften und Biegefestigkeit stehen 3899 Prüfkörper zur Verfügung. Für die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Holzabmessungen und Holzeigenschaften stehen insgesamt 6244 Prüfkörper zur Verfügung, da diese Zusammenhänge prüfmartunabhängig sind und deshalb dafür auch die verfügbaren Zugprüfkörper herangezogen werden konnten (Tab. 3.1).

Tab. 3.1: Versuchsdaten getrennt nach Prüffart und Breiten- und Höhenkategorie.

Prüffart	b in mm	h in mm					Summe
		h<=60	60<h<=100	100<h<=160	160<h<=200	200<h	
BF	b<=45						0
	45<b<=55	428					428
	55<b<=70	314					314
	70<b<=90	86					86
	90<b	133					133
	Summe	961	0	0	0	0	961
BH	b<=45	147	235	181	130	118	811
	45<b<=55		118	73	256		447
	55<b<=70		153	276	268	263	960
	70<b<=90			210	216	111	537
	90<b			49	49	85	183
	Summe	147	506	789	919	577	2938
BF & BH	Summe	1108	506	789	919	577	3899
Z	b<=45		290	720	83	434	1527
	45<b<=55		27	207	54	131	419
	55<b<=70		94	110	71	49	324
	70<b<=90				28	47	75
	90<b						0
	Summe	0	411	1037	236	661	2345
Summe		1108	917	1826	1155	1238	6244

Anmerkung: Abkürzungen siehe Abkürzungsverzeichnis S. xvii - xviii

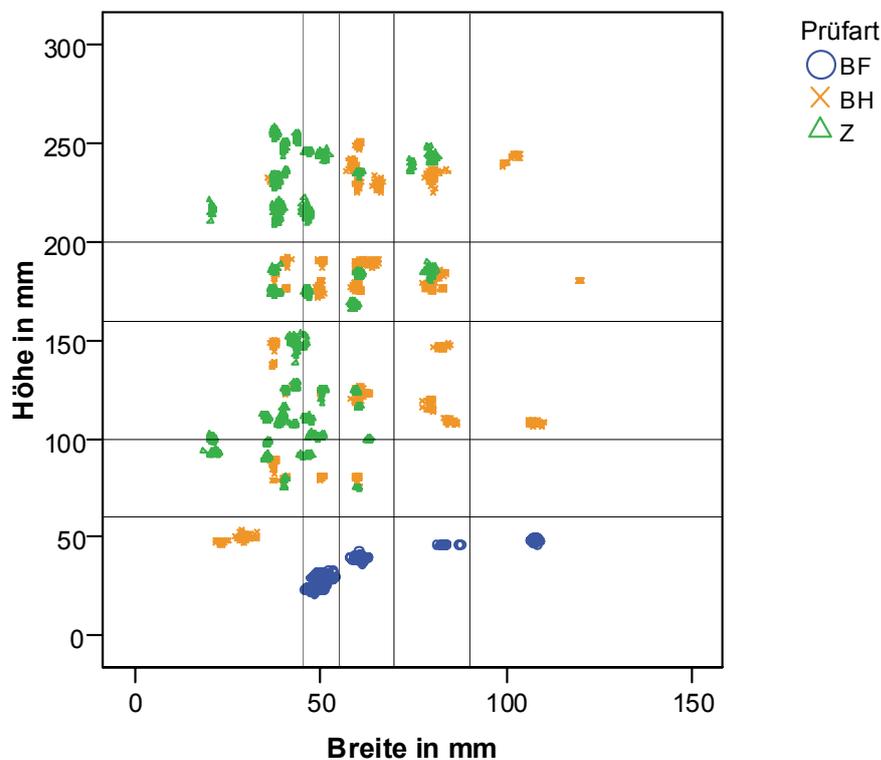


Abb. 3.2: Querschnittsabmessungen unterteilt nach Prüffart, n = 6244 PK.

3.2.2 Zusätzlich geprüfetes Material

Über den in Kap. 3.2.1 bereits genannten Prüfkörperumfang hinaus wurden zum Vergleich mit den aus früheren Untersuchungen vorliegenden Ergebnissen an kleinen ast- und fehlerfreien Prüfkörpern sowie zur Abschätzung des Einflusses der Prüfkörperlänge Biegeversuche an ast- und fehlerfreien Prüfkörpern durchgeführt. Insgesamt wurden dazu aus über 1000 Fichtenkanthölzern der Abmessungen 60x120 mm² und 80x180 mm² mit im Mittel 5 m Länge 300 möglichst homogene Abschnitte ausgewählt. Anhand der Abschnitte wurden diejenigen Prüfkörperquerschnitte festgelegt, die ast- und fehlerfrei aus dem zur Verfügung stehenden Material entnommen werden konnten. Die Prüfkörper wurden mit drei unterschiedlichen Querschnittshöhen und drei unterschiedlichen Prüfkörperlängen eingeschnitten. Die Breite wurde mit $b = 40$ mm konstant gehalten. Tab. 3.2 gibt einen Überblick über die eingeschnittenen Kollektive, Abb. 3.3 einen Überblick über die Prüfkörperdimensionen. Je Kollektiv wurden mindestens 31 möglichst ast- und fehlerfreie, faserparallel eingeschnittene Prüfkörper hergestellt. Beim Einschnitt wurde darauf geachtet, dass möglichst wenig Druckholz in den Prüfkörpern enthalten ist. Insgesamt wurden 281 Prüfkörper hergestellt. Die Prüfkörper wurden im Normklima (20°C, 65 % Luftfeuchte) klimatisiert und anschließend in Anlehnung an EN 408 auf Biegung geprüft. Um vor allem bei Prüfkörpern mit einer Höhe von $h = 120$ mm ein Kippen der Prüfkörper während der Belastung zu vermeiden, wurden während der Prüfung seitliche Führungsschienen angebracht. Dennoch konnte bei Prüfkörpern mit den Prüfabmessungen 40x120x720 mm³ kein Biegeversagen erzielt werden. Um die zur Verfügung stehenden Prüfkörper nutzen zu können, wurde deren Querschnittshöhe auf 80 mm reduziert. Deshalb enthält das Kollektiv mit den Abmessungen 40x80x720 mm³ vor der Prüfung die doppelte Anzahl an Biegeprüfungen. Vor der Auswertung mussten insgesamt 24 der 281 Prüfkörper aussortiert werden: Neun Prüfkörper wiesen trotz sorgfältiger Auswahl eine bruchrelevante Faserabweichung auf, sieben Prüfkörper versagten auf Schub, drei Prüfkörper erlitten bruchrelevante Querpressungen an den Kraftereinleitungsstellen, zwei Prüfkörper wiesen nach der Klimatisierung Risse auf, zwei weitere Prüfkörper versagten durch starke Druckfaltenbildung ohne Zugbruch, ein Prüfkörper war stark druckholzhaltig und nach der Klimatisierung aufgrund der dadurch bedingten Verformungen nicht mehr prüfbar. Somit standen zusätzlich zu den in Tab. 3.1 aufgeführten Prüfkörpern 257 ast- und fehlerfreie Prüfkörper zur Auswertung zur Verfügung.

Tab. 3.2: Holzabmessungen der ast- und fehlerfreien Prüfkörperkollektive mit $b = 40$ mm.

n (hergestellt) geprüft	h in mm			Σ
	40	80	120	
720	(31) 29	(62) 55	(0) 0	(93) 84
s 1440	(31) 28	(31) 29	(31) 28	(93) 85
in mm 2160	(33) 32	(31) 28	(31) 28	(95) 88
Σ	(95) 89	(124) 112	(62) 56	(281) 257

Anmerkung: Abkürzungen siehe Abkürzungsverzeichnis S. xvii - xviii



Abb. 3.3: Ast- und fehlerfreie Prüfkörperkollektive.

3.2.3 Zusammenstellung des Materials für die einzelnen Kapitel

Abb. 3.4 gibt einen Überblick über das gesamte, zur Verfügung stehende Material getrennt nach Prüffart und Sortiment und nennt, in welchen Kapiteln die Prüfkörper oder ein Teil der Prüfkörper Verwendung finden. Insgesamt stehen 6501 Prüfkörper zur Auswertung zur Verfügung.

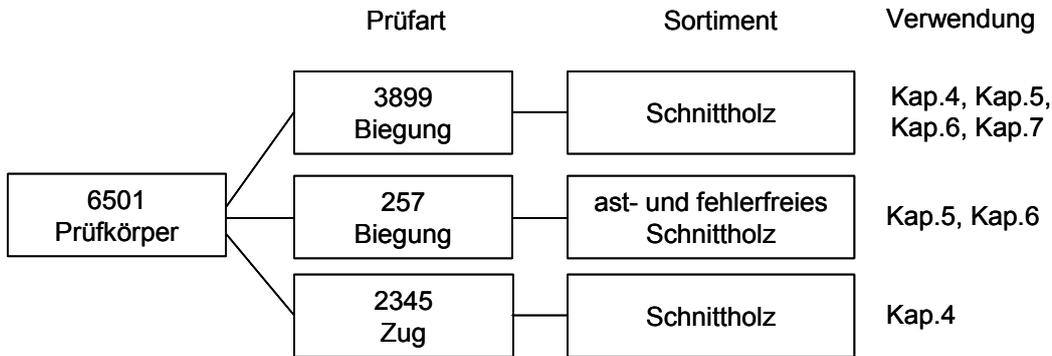


Abb. 3.4: Gesamtüberblick Material.

In Kap. 4 werden die Zusammenhänge zwischen den Holzabmessungen, den Holzeigenschaften und der Biegefestigkeit beschrieben. Diese Untersuchungen werden am bereits vorhandenen Material durchgeführt, da die zusätzlich geprüften Schnitthölzer ast- und fehlerfrei waren und zu der genannten Fragestellung keinen Beitrag liefern. Somit werden in Kap. 4 insgesamt 6244 Prüfkörper ausgewertet.

In Kap. 5 und Kap. 6 wird das Modell zur Beschreibung des Größeneffektes bei Biegung entwickelt und für unterschiedliche Prüfbedingungen verifiziert. In Kap. 7 wird der Einfluss der Sortierung auf den Größeneffekt untersucht. Für diese Auswertungen muss zusätzlich nach Prüfbedingungen unterschieden werden, weshalb am Anfang jedes Kapitels definiert wird, welche Prüfkörper für die folgende Auswertung verwendet werden. Für Kap. 5 bis Kap. 7 stehen insgesamt $3899 + 257 = 4156$ Prüfkörper zur Auswertung zur Verfügung.

3.3 Methoden

3.3.1 Erfassung der Holzabmessungen

Die Holzabmessungen werden vor der zerstörenden Prüfung computergestützt erfasst. Die Querschnittsabmessungen werden mit einer Schieblehre (Breite und Höhe des Prüfkörpers), die Längenmaße (Prüfkörperlänge, Stützweite und Kraftweite) mit einem Maßband aufgenommen. Die aufgenommenen Holzabmessungen beziehen sich auf die bei der Prüfung vorhandene Holzfeuchte. Die Prüfkörper werden vor der zerstörenden Prüfung entsprechend EN 408 im Normalklima bei 20°C und 65 % relativer Luftfeuchte gelagert, wobei sich bei Fichte eine Ausgleichsfeuchte von etwa 12 % einstellt. Die Bestimmung der tatsächlichen Holzfeuchte bei der Prüfung wird in Kap. 3.3.3 beschrieben.

3.3.2 Erfassung der Holzeigenschaft Ästigkeit

3.3.2.1 Allgemeines

Nadelhölzer bilden in jeder Wachstumsperiode so genannte Astquirle aus. Diese sind durch eine Häufung von Ästen, die den Stamm kranzförmig umschließen, gekennzeichnet. Diese Äste finden sich auch im Schnittholz und damit im Prüfkörper wieder. Bereiche mit und ohne Äste wechseln sich ab.

Je nach Einschnitt und Lage des Schnittholzes im Baum verändern sich das Astbild und damit die mechanischen Eigenschaften des Schnittholzes. Äste bewirken sowohl eine Querschnittsschwächung als auch eine lokale Faserabweichung. Der Einfluss der Äste auf die Schnittholzeigenschaften wird durch den Parameter „Ästigkeit“ erfasst. Die Ästigkeit ist international nicht einheitlich definiert. Generell wird zwischen zwei Ansätzen unterschieden:

- Die Ästigkeit wird als Verhältnis des Astdurchmessers zur Querschnittsseite, auf der der Ast zu Tage tritt, beschrieben.
- Die Ästigkeit wird als Verhältnis der auf den Schnittholzquerschnitt projizierten Astfläche zur Querschnittsfläche des Schnittholzes beschrieben.

Darüber hinaus wird zwischen der Ästigkeit eines einzelnen Astes und einer Astansammlung unterschieden. Im Folgenden werden unterschiedliche Arten der Ästigkeit und deren Berechnungsweisen vorgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden.

Da die Ästigkeit die Biegefestigkeit maßgeblich beeinflusst, werden innerhalb der Kraftweite Lage und Größe aller Äste größer als 5 mm Durchmesser nach GLOS & RICHTER (2002) digital erfasst. Die digitalisierte Form der Asterfassung ermöglicht unterschiedliche Varianten der Ästigkeitsberechnung.

3.3.2.2 Ästigkeit entsprechend DIN 4074-1

DIN 4074-1 gibt Sortierregeln für die visuelle Sortierung von Nadelschnittholz an. Da bei der visuellen Sortierung nur die Schnittholzseiten zur Begutachtung zur Verfügung stehen, werden für die Ästigkeit nach DIN 4074-1 die Verhältnisse von Astabmessungen zu Querschnittsseiten ermittelt. Um der unterschiedlichen Beanspruchungsart von unterschiedlichen Querschnittsgrößen und dem damit unterschiedlichen Einfluss der Äste Rechnung zu tragen, wird für Nadelholz entsprechend der Beanspruchungsart zwischen folgenden Sortierungen unterschieden:

- Kantholzsortierung,
- Brett- und Bohlenortierung,
- Lattensortierung.

Die Definitionen von Kantholz, Brett, Bohle und Latte sind in Tab. 3.3 dargestellt. Die Lattensortierung bleibt im Rahmen dieser Arbeit unberücksichtigt. Die Lattenquerschnitte werden in Abhängigkeit ihrer Prüforientierung entsprechend den Kriterien für Kanthölzer oder Bretter und Bohlen sortiert.

Tab. 3.3: Schnittholzeinteilung nach DIN 4074-1.

Schnittholzart	Dicke d bzw. Höhe h mm	Breite b mm
Latte	$d \leq 40$	$b < 80$
Brett ^a	$d \leq 40^b$	$b \geq 80$
Bohle ^a	$d > 40$	$b > 3 \cdot d$
Kantholz	$b \leq h \leq 3 \cdot b$	$b > 40$

^a Vorwiegend hochkant biegebeanspruchte Bretter und Bohlen sind wie Kantholz zu sortieren und entsprechend zu kennzeichnen.

^b Dieser Grenzwert gilt nicht für Bretter für BS-Holz.

Für Kanthölzer berechnet sich die Ästigkeit eines einzelnen Astes als Verhältniswert aus kleinstem sichtbarem Astdurchmesser des größten Astes bezogen auf die jeweilige Querschnittsseite (Abb. 3.5). Der ungünstigste Wert ist maßgebend. Dieses Astkriterium wird im Weiteren als DEK (**DIN Einzelast Kantholz**) bezeichnet:

$$DEK = \max \left\{ \begin{array}{l} d_i \\ h \\ d_i \\ b \end{array} \right. \quad (3.1)$$

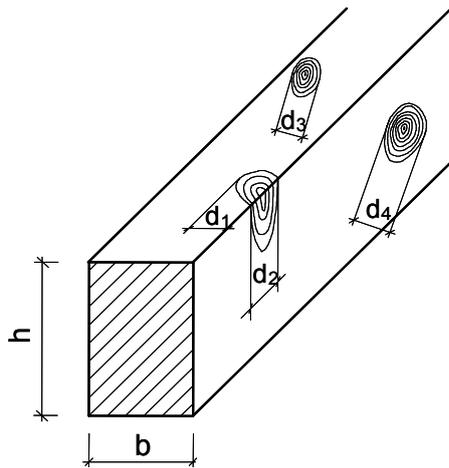


Abb. 3.5: Messung von Ästen in Kanthölzern (DEK).

Für Bretter und Bohlen wird die Ästigkeit eines einzelnen Astes als Verhältnis aus der Summe aller kantenparallel gemessenen Astdurchmesser des Astes bezogen auf die doppelte Querschnittsbreite berechnet (Abb. 3.6). Flügel- und Schmalseitenäste sind gesondert zu bewerten. Das Astkriterium wird im Weiteren als DEB (**DIN Einzelast Brett**) bezeichnet:

$$\text{DEB} = \frac{\sum a_i}{2 \cdot b} \quad (3.2)$$

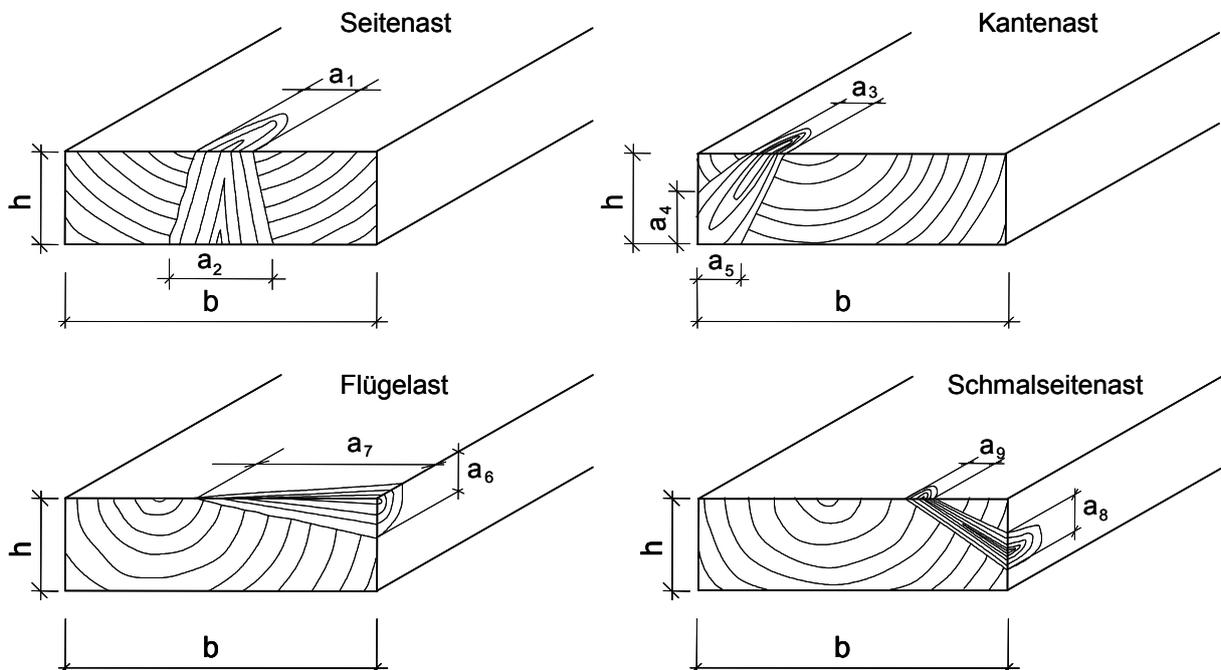


Abb. 3.6: Messung von Einzelästen in Brettern und Bohlen (DEB).

Neben Einzelästen werden bei Brettern und Bohlen auch Astansammlungen bewertet. Das Kriterium Astansammlung bezieht sich nach DIN 4074-1 immer auf eine Länge von 150 mm (Abb. 3.7). In diesem

Bereich werden alle vorhandenen Äste kantenparallel gemessen, die Werte aufaddiert und durch die doppelte Querschnittsbreite geteilt. Sich überlappende Astmaße werden nur einfach berücksichtigt. Dieses Kriterium wird im Weiteren mit DAB (**DIN Astansammlung Brett**) bezeichnet:

$$DAB = \frac{\sum a_i}{2 \cdot b} \quad (3.3)$$

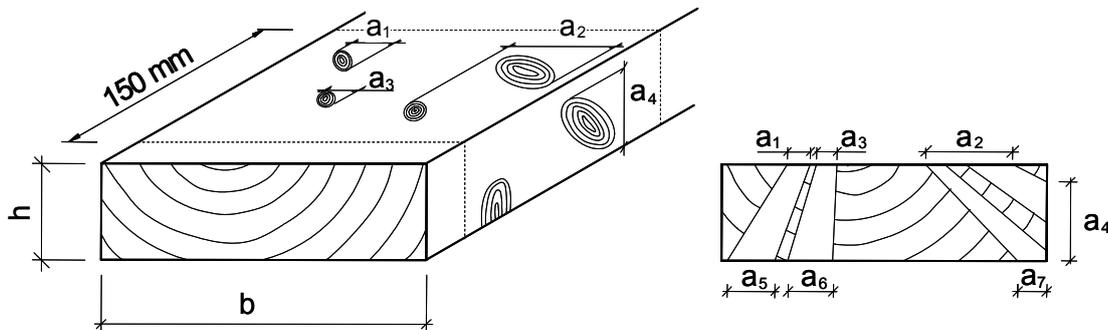


Abb. 3.7: Messung von Astansammlungen in Brettern und Bohlen (DAB).

3.3.2.3 Ästigkeit entsprechend ECE

Als Versuch zur Vereinheitlichung der visuellen Sortierregeln auf europäischer Ebene entwarf das Timber Committee der ECE (ECE = **E**conomic **C**ommission for **E**urope) der Vereinten Nationen 1989 die ECE-Regeln. Diese setzen in Anlehnung an die damaligen britischen Sortierregeln die in einem Querschnitt auftretenden Astflächen ins Verhältnis zur Querschnittsfläche des Schnittholzes. Dazu wird das Schnittholz imaginär durch rechtwinklig zur Schnittholzlänge verlaufende Schnittebenen geteilt. Alle angeschnittenen Äste werden über ihren kompletten Astverlauf auf die Schnittebene projiziert und die projizierten Astflächen ins Verhältnis zur Querschnittsfläche gesetzt. Sich überlappende Astflächen werden nur einmal berücksichtigt. Maßgebend ist der ungünstigste Wert.

Es wird zwischen der Ästigkeit im gesamten Querschnitt und der Ästigkeit in den in Richtung der Biegebeanspruchung äußeren Vierteln des Querschnitts unterschieden. Die Ästigkeit des Gesamtquerschnitts wird im Weiteren mit tECE (**t**otal **E**CE) bezeichnet. Die Berechnungsmethode ist in Abb. 3.8 dargestellt. Die Berechnung der Ästigkeit in nur einem Teil des Querschnitts ist im Hinblick auf die Biegefestigkeit sinnvoll. Bei Biegung werden vor allem die äußeren Bereiche den größten Spannungen ausgesetzt, die Symmetrieebene des Querschnitts bleibt weitgehend spannungsfrei (Abb. 2.2). Deshalb werden bei der Ästigkeit mECE (**m**argin **E**CE) nur die äußeren Viertel der Querschnittsfläche und auch nur die Astflächen in diesem Bereich zur Bewertung der Ästigkeit herangezogen. Der größere der beiden sich ergebenden mECE-Ästigkeitswerte ist maßgebend. Die Berechnungsmethode ist in Abb. 3.9 dargestellt.

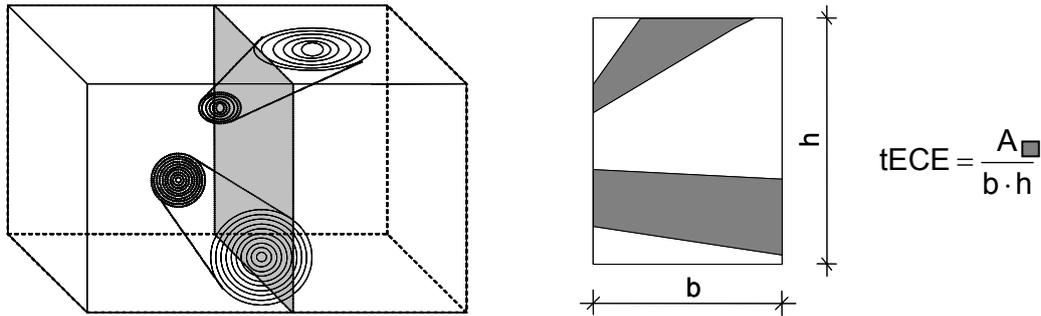


Abb. 3.8: Berechnung der Ästigkeit tECE.

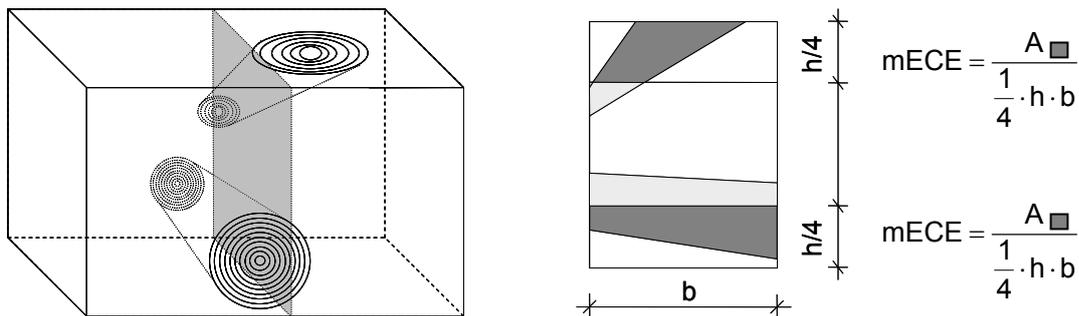


Abb. 3.9: Berechnung der Ästigkeit mECE.

3.3.2.4 Zusätzlich berechnete Ästigkeiten

Die Ästigkeiten tKAR (**t**otal **K**not **A**rea **R**atio) und mKAR (**m**argin **K**not **A**rea **R**atio) stellen eine Erweiterung der Berechnungsmethode nach ECE dar, wobei nicht nur die Äste innerhalb einer Querschnittsfläche in die Berechnung eingehen, sondern alle Äste in einem Bereich von 150 mm Länge berücksichtigt werden. Diese Astberechnungsmethode kombiniert somit das Kriterium Astansammlung nach DIN 4074-1 mit der querschnittsbezogenen Berechnung der Ästigkeit nach ECE. Alle zu berücksichtigenden Astflächen werden auf die Querschnittsfläche projiziert, sich überlappende Astflächen nur einmal berücksichtigt. Im Fall des tKAR wird die komplette Querschnittsfläche zur Berechnung der Ästigkeit herangezogen, im Fall des mKAR wird die Ästigkeit nur in den äußeren Vierteln der Querschnittsfläche berechnet, wobei das Viertel mit der größten Ästigkeit maßgebend ist.

Da die Biegebeanspruchung mit zunehmendem Abstand von der Symmetrieebene zunimmt, wird der Abstand der Äste zur Symmetrieebene des Querschnitts bei den folgenden Ästigkeiten mit eingerechnet. Abb. 3.10 zeigt die angewandte Berechnungsmethode. Für jeden Einzelast E werden die Astfläche A und die Lage des Astschwerpunktes berechnet. Die jeweilige Astfläche wird durch ein flächenäquivalentes Rechteck um die Schwerpunktlage des ursprünglichen Astes ersetzt. Liegt der Astschwerpunkt so weit außen, dass die flächenäquivalente Rechtecksfläche die Querschnittsränder überschreiten würde, wird der Astschwerpunkt zur Symmetrieebene hin verschoben, bis die Rechtecksfläche bündig mit der Querschnittsfläche abschließt.

3.3.3 Erfassung der Holzfeuchte

Zur Ermittlung der Holzfeuchte u wird direkt im Anschluss an die Biegeprüfung aus jedem Prüfkörper in der Nähe der Bruchstelle ein Probestreifen entnommen. Nach EN 408 und DIN EN 13183-1 wird der Probestreifen, der astfrei und frei von Harzgallen sein muss, direkt nach der Entnahme gewogen (m_u = Masse bei der Holzfeuchte u), dann im Darrofen bei 103°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und nochmals gewogen (m_0 = Masse bei der Holzfeuchte $u = 0$ %). Die Holzfeuchte ergibt sich aus Gl. (3.8):

$$u = \frac{m_u - m_0}{m_0} \cdot 100 \text{ in \%} \quad (3.8)$$

3.3.4 Erfassung der Holzeigenschaft Darr-Rohdichte

Gleichzeitig mit der Holzfeuchte wird die Darr-Rohdichte ρ_0 nach EN 408 und DIN 52182 am Probestreifen bestimmt, wobei die Masse des darrtrockenen Holzes durch Wägung und das Volumen durch Auftriebsmessung ermittelt werden. Die Darr-Rohdichte entspricht der Rohdichte des Holzes bei einer Feuchte von $u = 0$ %. Zur Kontrolle wird die Darr-Rohdichte ρ_0 mit der ebenfalls aufgenommenen Prüfkörper-Rohdichte ρ_{PK} verglichen. Die Prüfkörper-Rohdichte wird durch Division der Prüfkörpermasse durch das Prüfkörpervolumen ermittelt. Das Volumen wird über die Holzabmessungen bestimmt. Weil Äste in der Regel eine höhere Dichte aufweisen als das umgebende Holz und die Holzfeuchte die Masse des Prüfkörpers stärker beeinflusst als dessen Volumen, muss ρ_{PK} größer als ρ_0 sein. Abb. 3.11 zeigt den Zusammenhang zwischen ρ_{PK} und ρ_0 anhand von 3549 Biegeprüfkörpern. Von 350 der 3899 Biegeprüfkörper wurde kein Prüfkörpergewicht dokumentiert. Bei 4 Prüfkörpern überschreitet die Darr-Rohdichte die Prüfkörper-Rohdichte deutlich. Drei der vier Prüfkörper wiesen Äste im Probestreifen auf, was zu einer Verfälschung der Darr-Rohdichte führt, ein Prüfkörper wies keine Besonderheit auf, was auf eine Fehlmessung hindeutet. Bei den wenigen Prüfkörpern, bei denen die Darr-Rohdichte größer als die Prüfkörper-Rohdichte ist, kann dies entweder auf einen nicht ordnungsgemäß ausgewählten Probestreifen oder auf einen lokal sehr hohen Druckholzanteil im Probestreifen zurückgeführt werden (Kap. 4.3.5). Bei den vier gekennzeichneten Prüfkörpern wurde die Darr-Rohdichte auf den Erwartungswert korrigiert.

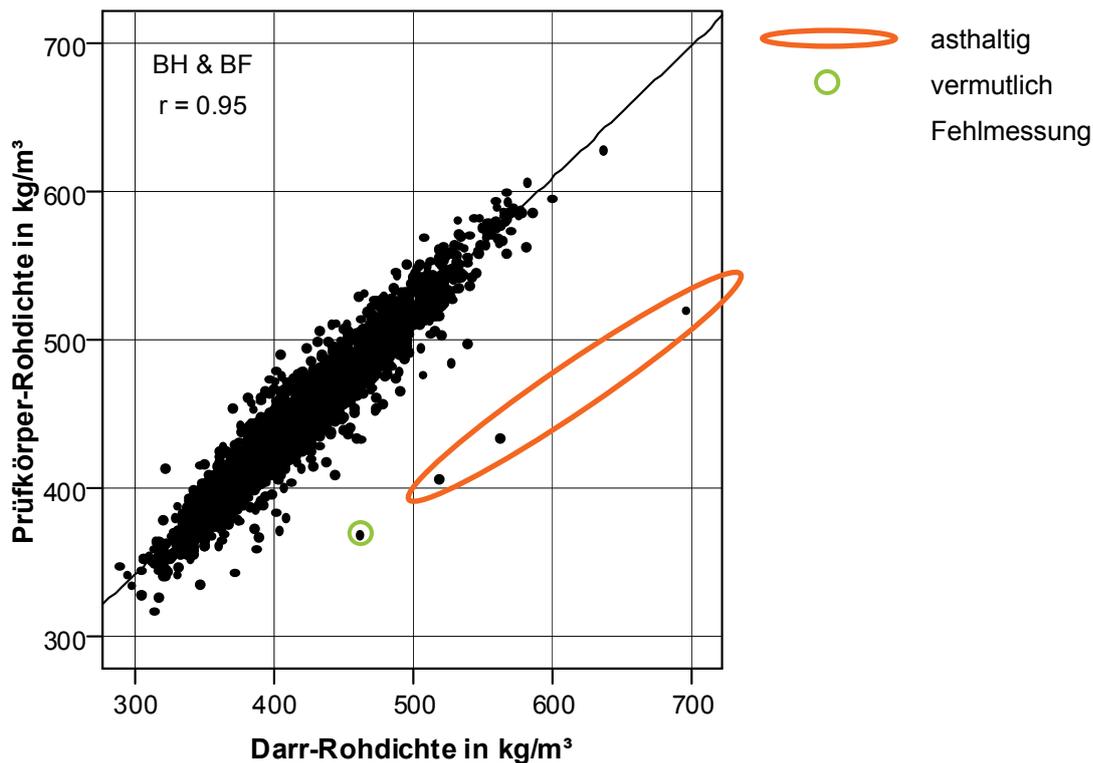


Abb. 3.11: Prüfkörper-Rohdichte über Darr-Rohdichte, $n = 3549$ PK.

3.3.5 Erfassung der Holzeigenschaft Jahringbreite

Ein weiterer, die Festigkeit beeinflussender Faktor ist die Jahringbreite jrb . Sie beschreibt die radiale Ausdehnung des Jahrrings. Ein Jahrring setzt sich aus Frühholz und Spätholz zusammen und variiert seine Breite mit der Holzart, dem Boden, dem Klima, dem Baumalter und waldbaulichen Maßnahmen (WAGENFÜHR 1999). Im Rahmen dieser Arbeit wird die Jahringbreite anhand des entnommenen Probestreifens in Anlehnung an DIN 4074-1 ermittelt, wobei bei markhaltigen Prüfkörpern auch der Bereich 25 mm um das Mark mit in die Jahringbreite eingerechnet wird (Abb. 3.12).

Wie Abb. 3.12 zeigt, wird die Jahringbreite ermittelt, indem vom marknächsten bis zum markfernten Jahrring rechtwinklig zu den Jahrringen eine Messstrecke der Länge ℓ durch die Anzahl n der Jahrringe entlang dieser Messstrecke geteilt wird (Gl. (3.9)):

$$jrb = \frac{\sum \ell_i}{n} \text{ in mm} \quad (3.9)$$

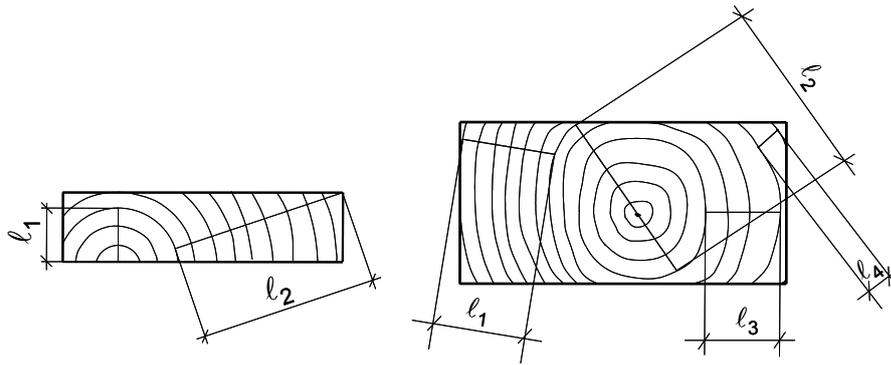


Abb. 3.12: Ermittlung der Jahrringbreite in Anlehnung an DIN 4074-1.

3.3.6 Erfassung der Holzeigenschaft Druckholzanteil

Druckholz wird gebildet, wenn äußere Kräfte langfristig auf den Stamm von Nadelhölzern einwirken. Z.B. bilden Bäume in Hanglagen oft Druckholz aus. Druckholzbereiche weisen breitere Jahrringe und einen höheren Spätholzanteil als „normales“ Holz auf (HOFFMEYER 1995). Am Schnittholz lässt sich der Druckholzanteil dh an den Stirn- und Seitenflächen durch die dunklere Färbung abschätzen. Um eine Information des Druckholzanteils in der Nähe der Bruchstelle zu erhalten, wird der Druckholzanteil am Probestreifen als Fläche des Druckholzes in Prozent der Querschnittsfläche aufgenommen. Da die Druckholzverteilung im Stamm über die Stammhöhe und damit im Prüfkörper über die Prüfkörperlänge schwanken kann, ist dieser am Probestreifen ermittelte Druckholzanteil nur ein Schätzwert für den Prüfkörper.

3.3.7 Erfassung weiterer Holzeigenschaften

Weil sich die anatomischen Holzeigenschaften im Nadelholz mit zunehmendem Baumalter, d.h. mit zunehmender Entfernung vom Mark, verändern, wird anhand der Probestreifen die Entfernung des Prüfkörpermittelpunktes vom Mark abgeschätzt. Abb. 3.13 verdeutlicht das Vorgehen bei der Ermittlung des Markabstandes m : Auf einer durchsichtigen Folie mit konzentrischen Kreisen im Abstand von 1 cm wird der Probestreifen so lange verschoben, bis die Krümmung der Jahrringe mit der Krümmung der konzentrischen Kreise bestmöglich übereinstimmt. Der Abstand des Prüfkörpermittelpunktes zum Kreismittelpunkt wird auf 1 mm genau gemessen und notiert. Der in der Regel nicht kreisrunde Stammquerschnitt und die Entnahme des Probestreifens bei Wuchsstörungen oder in der Nähe von Ästen können diese Messung verfälschen. Ergebnisse können daher nur Tendenzen aufzeigen.

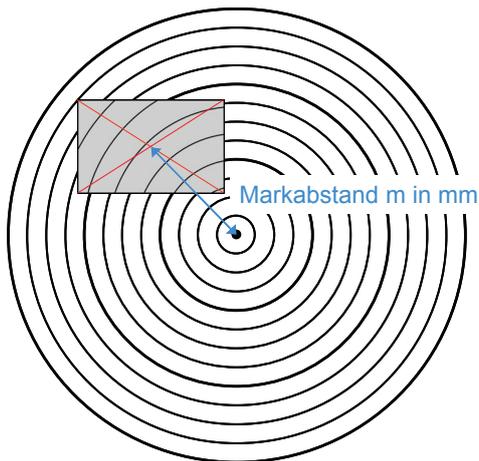


Abb. 3.13: Ermittlung des Markabstandes.

Die Biegefestigkeit von Vollholz in Gebrauchsabmessungen wird meist durch die Zugfestigkeit im zugbeanspruchten Randbereich bestimmt. Um herauszufinden, ob die Lage der Jahrringe in der Zugzone des Prüfkörpers die Biegefestigkeit beeinflusst, wird die Jahrringlage α der Probestreifen nach dem in Abb. 3.14 dargestellten Schema im äußeren Viertel des Querschnitts aufgenommen. Dabei wird je nach Orientierung der Jahrringe und zwischen markhaltigen und markfreien Prüfkörpern unterschieden.

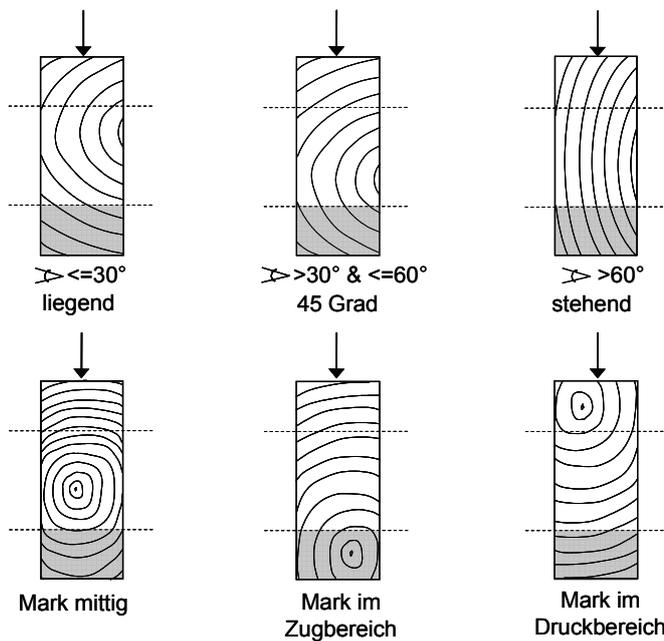


Abb. 3.14: Ermittlung der Jahrringlage.

Auch sonstige biologische Faktoren wie z.B. durch Wipfelbrüche hervorgerufene, starke örtliche Faserabweichungen, Ringschäle, Risse oder Stauchfalten können die Biegefestigkeit beeinflussen. Alle diese Faktoren verringern die Biegefestigkeit mehr oder weniger stark, werden aber über die bisher genannten Holzeigenschaften nicht abgedeckt. Um die Identifizierung von Ausreißern zu erleichtern, werden deshalb sämtliche biologische Faktoren vor, während und nach der Biegeprüfung des Schnittholzes dokumentiert.

Insgesamt weisen 3,7 % der 3899 Biegeprüfkörper derartige Wuchsunregelmäßigkeiten oder Schäden auf.

Eine Voraussetzung der WEIBULL-Theorie ist sprödes Materialversagen. Anhand der Spannungs-Dehnungs-Linie wird die Versagensart nach dem in Abb. 2.4 dargestellten Schema ermittelt, um herauszufinden, wie viele Biegeprüfkörper sprödes Versagen aufweisen. Auch bei dieser Variablen gilt, dass die Einteilung nur Tendenzen aufzeigt, da z.B. rein sprödes Materialverhalten bei Biegung nicht stattfindet.

3.3.8 Erfassung der Biegefestigkeit

Für jeden Prüfkörper wird entsprechend EN 384 ein „kritischer Querschnitt“ bestimmt, „an dem nach Augenschein und nach anderen Informationen ... vermutlich der Bruch eintreten wird“ (DIN EN 384:2004-05, Abschnitt 5.2). Dieser kritische Querschnitt muss bei der Prüfung im Bereich der größten Beanspruchung angeordnet werden. Bei der Biegeprüfung wird der kritische Querschnitt also innerhalb der Kraftweite angeordnet (Abb. 3.1).

Nach der Klimatisierung und der Asterfassung werden die Prüfkörper nach EN 408 geprüft und die Holzabmessungen, die Last-Verformungs-Linie und die Bruchlast protokolliert. Die Biegefestigkeit wird mit Hilfe der Bruchlast, den Holzabmessungen und der Prüfanordnung nach Gl. (2.1) bestimmt. Da die Biegefestigkeit auch von Vorschäden beeinflusst werden kann, werden diese vor der zerstörenden Prüfung vermerkt (Kap. 3.3.7). Nach dem Versagen werden zusätzlich die Bruchursache und der Versagensmechanismus notiert. Der Elastizitätsmodul wird über eine lineare Regression aus der Last-Verformungs-Linie im Bereich zwischen 10 % und 40 % der Bruchlast bestimmt.

3.3.9 Statistische Auswerteverfahren

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten statistischen Methoden und Auswerteverfahren werden jeweils an der Stelle beschrieben, an der sie auch angewandt werden.

In diesem Kapitel wird die Verwendung des Korrelationskoeffizienten von SPEARMAN diskutiert. Der Korrelationskoeffizient ist eine Maßzahl für die Stärke eines linearen Zusammenhangs. Der am häufigsten verwendete Korrelationskoeffizient ist der PEARSONSCHE Maßkorrelationskoeffizient, der allerdings eine Normalverteilung beider Variablen voraussetzt. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Korrelationskoeffizient nach SPEARMAN r_{SP} verwendet, der für jede zweidimensionale Stichprobe mit beliebiger stetiger Verteilung eine gültige Schätzung ermöglicht. Abb. 3.15 zeigt am Beispiel der in dieser Arbeit anhand aller 4156 Prüfkörper durchgeführten und in den folgenden Kapiteln beschriebenen Korrelationsanalysen, dass sich dieser Korrelationskoeffizient von dem vielfach verwendeten Korrelationskoeffizient nach PEARSON bei den hier verfügbaren großen Datenmengen nicht nennenswert unterscheidet.

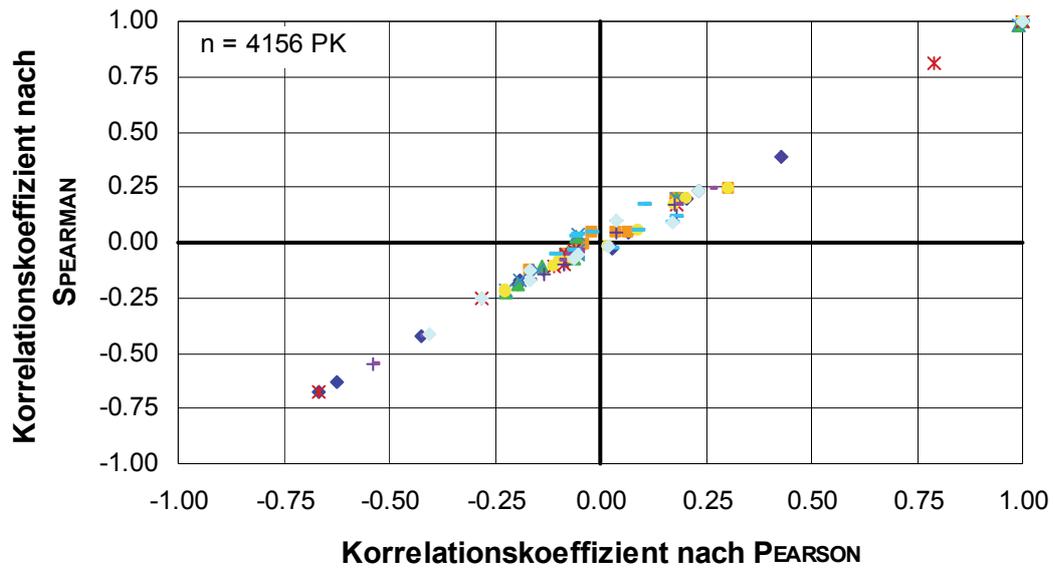


Abb. 3.15: Vergleich der Korrelationskoeffizienten von SPEARMAN und PEARSON, n = 4156 PK.

4. Zusammenhänge zwischen Holzabmessungen, Holzeigenschaften und Biegefestigkeit

4.1 Definitionen

Holzabmessungen, Holzeigenschaften und die Biegefestigkeit von Holz stehen in einem komplexen Zusammenhang. Um den Größeneffekt ganzheitlich zu erfassen, müssen diese Zusammenhänge untersucht werden und es muss geklärt werden, welche Zusammenhänge sich auf den Größeneffekt wie auswirken. Abb. 4.1 zeigt die Zusammenhänge schematisch und beinhaltet die Verweise auf die jeweiligen Kapitel, in denen die einzelnen Abhängigkeiten behandelt werden.

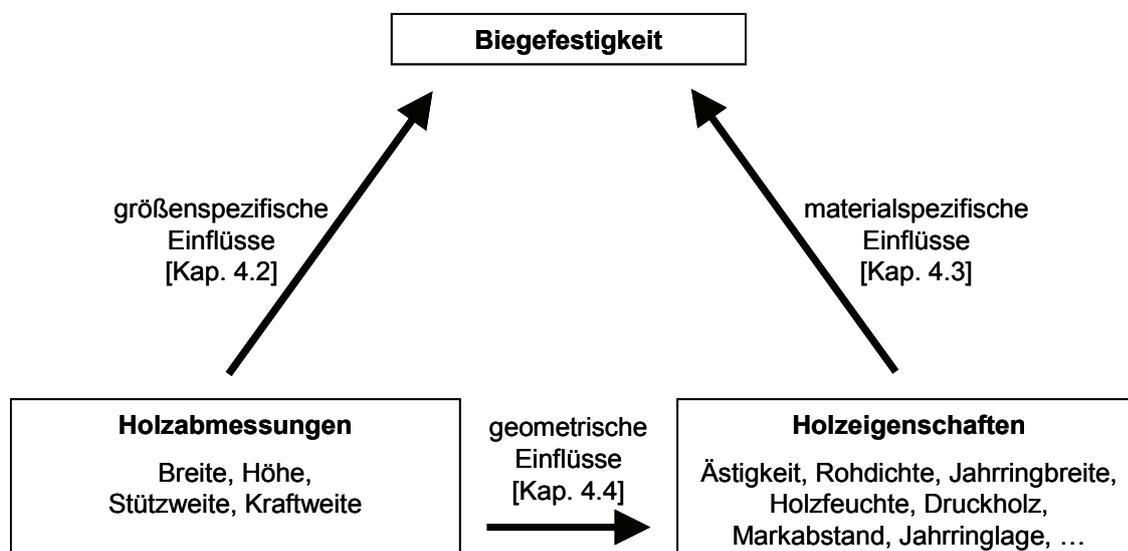


Abb. 4.1: Zusammenhänge zwischen Holzeigenschaften, Holzabmessungen und Biegefestigkeit.

Als Größeneffekt wird der empirisch ermittelte Einfluss der Holzabmessungen auf die Biegefestigkeit bezeichnet. Der Einfluss der Holzabmessungen auf die Holzeigenschaften und der damit verbundene indirekte Einfluss auf die Biegefestigkeit sind darin implizit enthalten, werden aber nicht explizit erfasst und diskutiert. Im Folgenden werden diese Einflüsse gesondert untersucht und als „größenspezifische“, „geometrische“ und „materialspezifische“ Einflüsse bezeichnet. Als geometrische Einflüsse werden dabei die Abhängigkeiten zwischen den Holzabmessungen und den Holzeigenschaften bezeichnet, die

beispielsweise durch die Einschnittgeometrie oder die abmessungsbedingt spezifische Lage des Schnittholzes im Stammquerschnitt zustande kommen.

4.2 Einfluss der Holzabmessungen auf die Biegefestigkeit (größenspezifische Einflüsse)

In diesem Kapitel werden die Einflüsse der Holzabmessungen auf die Biegefestigkeit und damit die größenspezifischen Einflüsse (Abb. 4.1) anhand der 3899 Biegeprüfkörper (Tab. 3.1, Abb. 3.4) dargestellt.

Abb. 4.2 zeigt den Einfluss der Querschnittsbreite auf die Biegefestigkeit. Die Biegefestigkeit nimmt im Mittel mit zunehmender Breite zu. Dies steht im Gegensatz zur WEIBULL-Theorie, bei der mit zunehmendem Volumen die Festigkeit abnimmt, deckt sich aber mit den Ergebnissen von MADSEN & STINSON (1982) und MARCHAND & FUX (1983). Der direkte Einfluss der Breite auf die Biegefestigkeit wird allerdings von allen anderen Faktoren wie Höhe und Stützweite sowie sämtlichen Holzeigenschaften überlagert. Diese erklären die verbleibende große Streuung der Biegefestigkeit beziehungsweise den geringen Korrelationskoeffizienten $r = r_{SP} = 0.14$.

Abb. 4.3 zeigt den Einfluss der Querschnittshöhe auf die Biegefestigkeit. Die Biegefestigkeit nimmt im Mittel mit zunehmender Höhe ab. Der direkte Einfluss der Höhe auf die Biegefestigkeit wird ebenfalls durch sämtliche andere, die Biegefestigkeit beeinflussenden Faktoren überlagert, was an der großen Streuung der Biegefestigkeit bei konstanter Höhe sowie am geringen Korrelationskoeffizienten ($r = r_{SP} = -0.13$) zu erkennen ist.

Abb. 4.4 zeigt den Einfluss der Stützweite auf die Biegefestigkeit. Der Vergleich mit Abb. 4.3 zeigt die gleiche Tendenz wie für die Querschnittshöhe. Da Stützweite und Querschnittshöhe aufgrund der Prüfanordnung voneinander abhängig sind, lassen sich der ähnliche Verlauf der Regressionsgeraden sowie der ähnlich niedrige Korrelationskoeffizient ($r = r_{SP} = -0.12$) über das in der Regel konstante Verhältnis von Stützweite zu Querschnittshöhe erklären.

Um den Gesamteinfluss der Holzabmessungen auf die Biegefestigkeit zu klären, werden im Weiteren die materialspezifischen sowie die geometrischen Einflüsse erläutert.

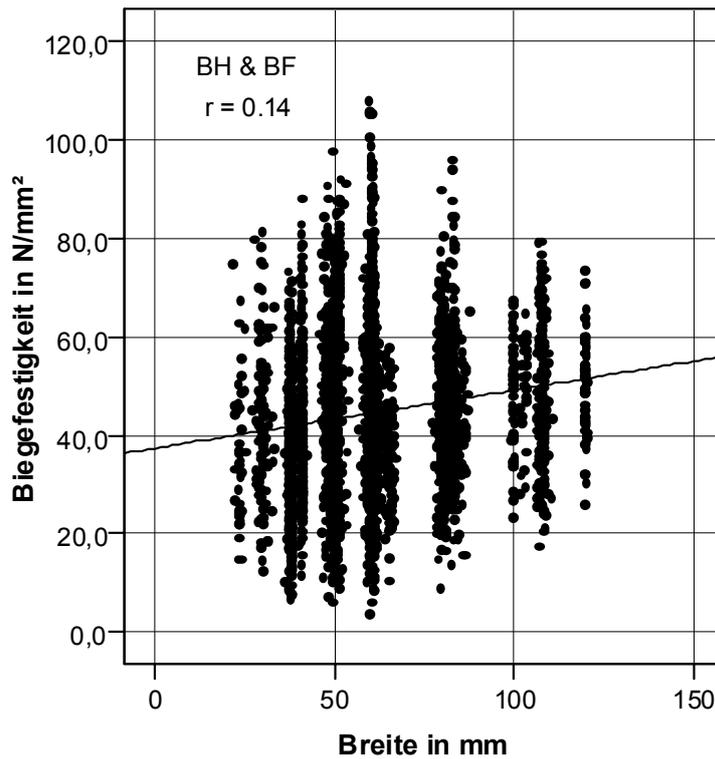


Abb. 4.2: Einfluss der Breite auf die Biegefestigkeit, n = 3899 PK.

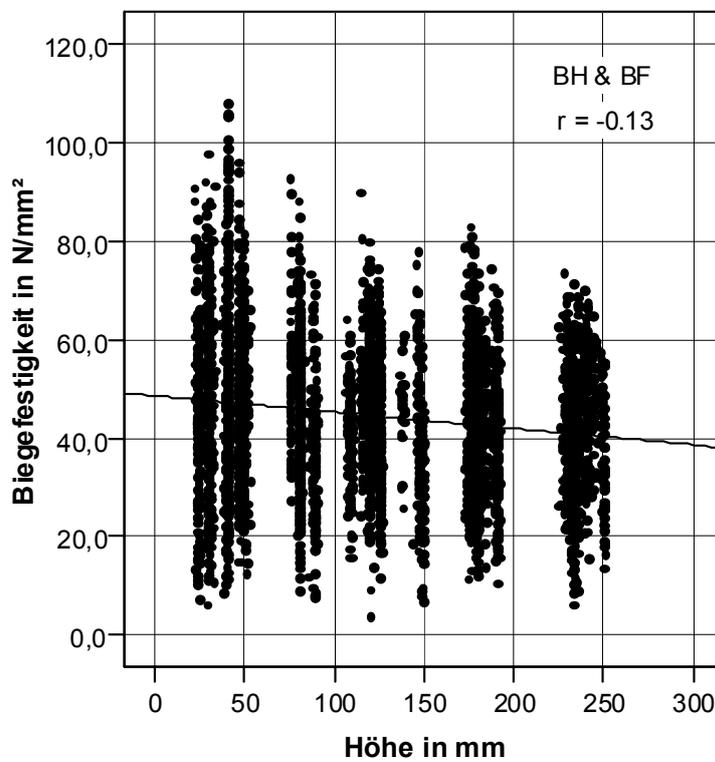


Abb. 4.3: Einfluss der Höhe auf die Biegefestigkeit, n = 3899 PK.

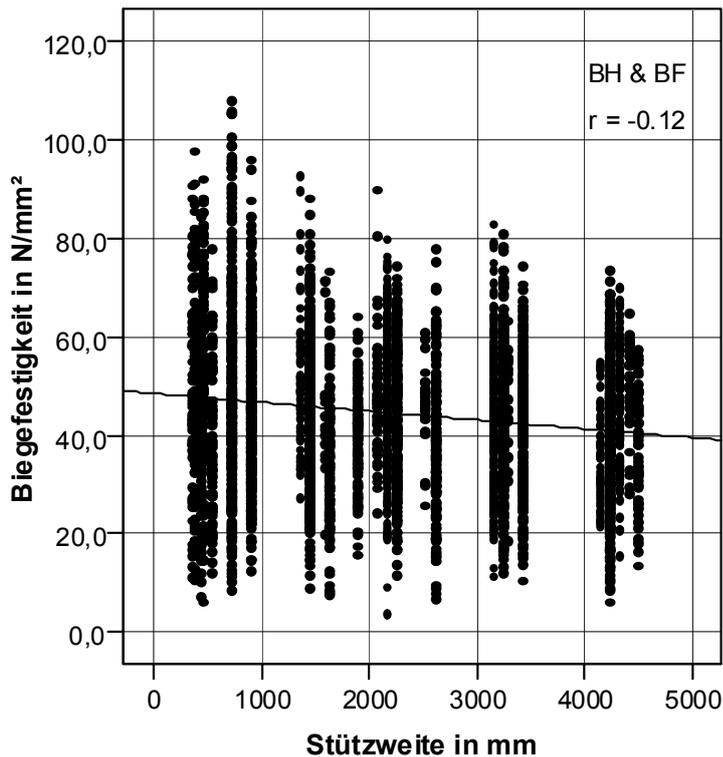


Abb. 4.4: Einfluss der Stützweite auf die Biegefestigkeit, $n = 3899$ PK.

4.3 Einfluss der Holzeigenschaften auf die Biegefestigkeit (materialspezifische Einflüsse)

4.3.1 Einfluss der Ästigkeit

Aus der Vielzahl der erläuterten Ästigkeiten wird im Weiteren diejenige Ästigkeit ausgewählt, die die höchste direkte Aussagekraft in Bezug auf die Biegefestigkeit besitzt, d.h. den größten direkten Korrelationskoeffizienten aufweist. Tab. 4.1 zeigt nach Prüffart getrennt die Korrelationskoeffizienten r_{SP} der unterschiedlichen Ästigkeiten innerhalb der jeweiligen Kraftweite mit der beim Versuch ermittelten Biegefestigkeit. Die nach Querschnitt getrennten Korrelationskoeffizienten r_{SP} können Tab. A.7 entnommen werden. Je nach Prüffart und Kollektiv und jeweils zufälliger Größe und Lage der Äste im Schnittholz korrelieren die Ästigkeiten unterschiedlich gut. Tendenziell zeigt sich, dass die auf den Querschnitt bezogenen Ästigkeiten höher korrelieren als die Ästigkeiten nach DIN 4074-1. Dies ist zu erwarten, da die im Querschnitt berechneten Ästigkeiten den Astverlauf im Schnittholz berücksichtigen. Die Berücksichtigung des Astabstandes zur Symmetrieebene bringt keine Verbesserung in der direkten Korrelation zur Biegefestigkeit. Die Querschnittsästigkeiten $tKAR$ und $mKAR$ weisen für alle Biegeprüfkörper die höchsten direkten Korrelationen zur Biegefestigkeit auf. Dies gilt auch, wenn das Gesamtkollektiv in die Einzelkollektive BF und BH unterteilt wird. Für die folgenden Untersuchungen werden deshalb die Ästigkeiten $tKAR$ und $mKAR$ verwendet.

Tab. 4.1: Korrelationskoeffizienten r_{SP} der Ästigkeiten zur Biegefestigkeit getrennt nach Prüffart.

Prüffart	n	DEB	DAB	DEK	tECE	mECE	tKAR	mKAR	E_s1	E_s2	A_s1	A_s2
BF	961	-0.61	-0.70	-0.61	-0.69	-0.75	-0.70	-0.76	-0.40	-0.23	-0.40	-0.23
BH	2938	-0.44	-0.53	-0.60	-0.59	-0.62	-0.61	-0.62	-0.57	-0.54	-0.59	-0.55
alle	3899	-0.41	-0.52	-0.56	-0.57	-0.63	-0.59	-0.63	-0.39	-0.34	-0.43	-0.35

Anmerkung: Abkürzungen siehe Abkürzungsverzeichnis S. xvii - xviii

Abb. 4.5 zeigt den Einfluss der Ästigkeit tKAR auf die Biegefestigkeit. Die Biegefestigkeit nimmt mit zunehmender Ästigkeit ab. Aufgrund des Streudiagramms könnte ein linearer Zusammenhang zwischen der Ästigkeit tKAR und der Biegefestigkeit angenommen werden. Allerdings zeigen sowohl eine Kurvenanpassung als auch theoretische Überlegungen, dass der Zusammenhang nichtlinear ist: Schnitthölzer mit einer Ästigkeit nahe tKAR = 1,0 weisen eine Resttragfähigkeit auf, die größer als Null ist. Abb. 4.6 zeigt den Einfluss der Ästigkeit mKAR auf die Biegefestigkeit. Auch hier nimmt die Biegefestigkeit mit zunehmender Ästigkeit ab. Die mKAR-Werte sind tendenziell größer als die tKAR-Werte. Der Zusammenhang zwischen Biegefestigkeit und mKAR ist ebenfalls nichtlinear.

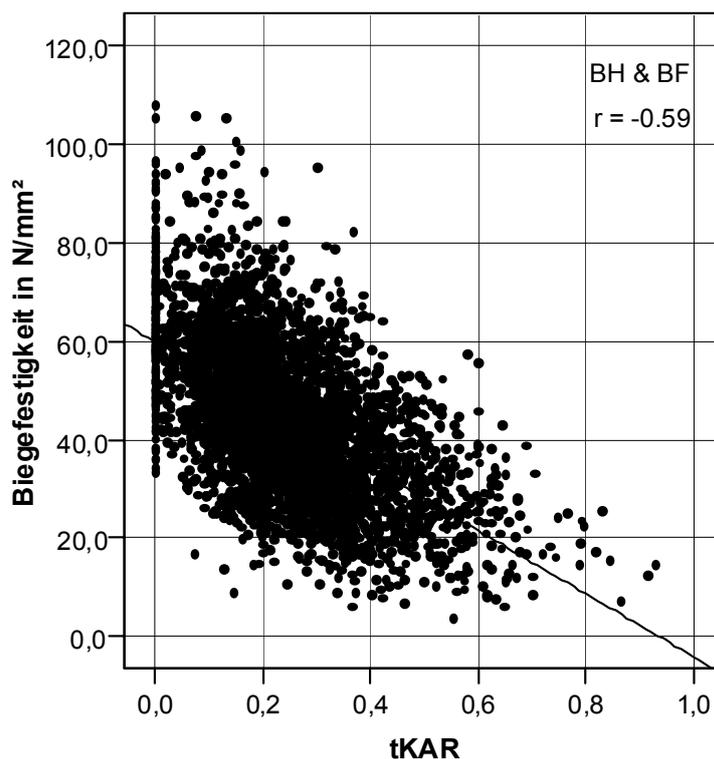


Abb. 4.5: Biegefestigkeit über Ästigkeit tKAR, n = 3899 PK.

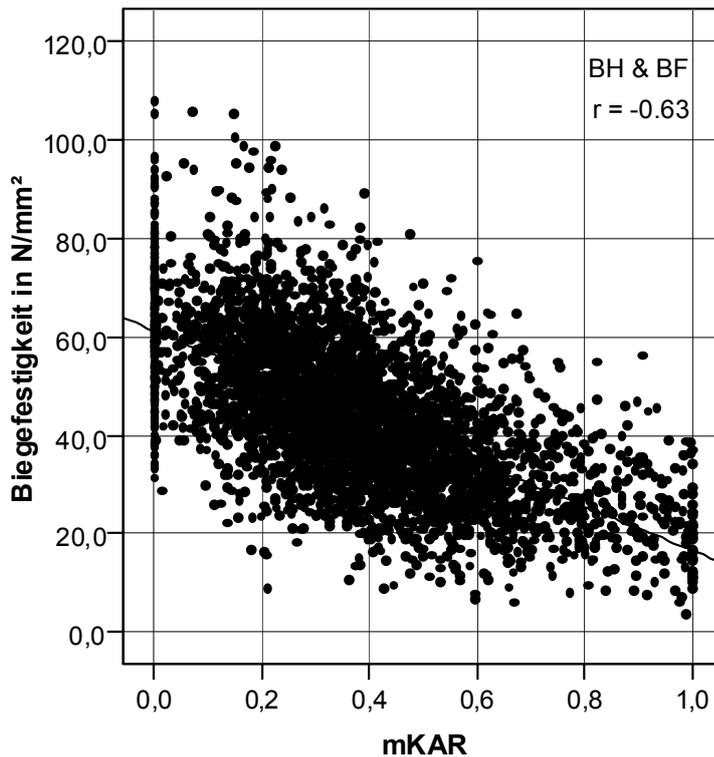


Abb. 4.6: Biegefestigkeit über Ästigkeit mKAR, n = 3899 PK.

4.3.2 Einfluss der Holzfeuchte

Abb. 4.7 zeigt die Häufigkeitsverteilung und die wesentlichen Kennwerte der Holzfeuchte u für alle 3899 Biegeprüfkörper. Der Mittelwert der Holzfeuchte liegt bei $u = 12,5 \%$. Da vor allem bei großen Querschnitten vor der Prüfung im meist engen Projektzeitrahmen keine vollständige Klimatisierung möglich ist, streuen die Holzfeuchten zwischen $u = 7,9 \%$ und $u = 16,1 \%$. Der Variationskoeffizient liegt bei $9,3 \%$.

In Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass die Holzfeuchte die Biegefestigkeit auch bei den hier vorliegenden geringen Streuungen beeinflusst. Um den Größeneffekt unter Normbedingungen bei einer dafür vorgeschriebenen Holzfeuchte von $u = 12 \%$ abbilden zu können, wird die Biegefestigkeit auf $u = 12 \%$ Holzfeuchte umgerechnet. Dazu wird Gl. (3.10) verwendet:

$$f_m(u = 12\%) = f_m(u) + f_m(u) \cdot (u - 12) \cdot (0,02 + (f_m(u) - 45) / 2000) \quad (3.10)$$

Gl. (3.10) wurde auf Grundlage von GLOS (1981, Tab. 2) und MADSEN ET AL. (1980, Bild 3) (GLOS 1981) hergeleitet. Beide Autoren geben an, dass die Biegefestigkeit von Nadelholz in Abhängigkeit von der Holzqualität pro Prozent Holzfeuchteabnahme unterschiedlich stark zunimmt. Auf dem Niveau des 95%-Quantils nimmt die Biegefestigkeit nach GLOS um $+3,5 \%$, auf dem Niveau des Mittelwertes um $+2 \%$ und auf dem Niveau des 5%-Quantils um 0% zu, wenn die Holzfeuchte um $\Delta u = 1 \%$ abnimmt. Diese Werte gelten für einen Feuchtebereich von $u = 5 \%$ bis $u = 25 \%$ bei einem Basiswert von $u = 12 \%$. Der von MADSEN ET AL. (1980) (GLOS 1981) anhand von Douglasie hergeleitete Zusammenhang zwischen

Biegefestigkeit und Holzfeuchtegehalt stimmt mit dieser Festlegung weitgehend überein. Da die Holzfeuchte schon vor der Korrektur nur wenig streut (Abb. 4.7), verändern sich die Biegefestigkeitswerte aufgrund der Feuchtekorrektur nach Gl. (3.10) nur geringfügig.

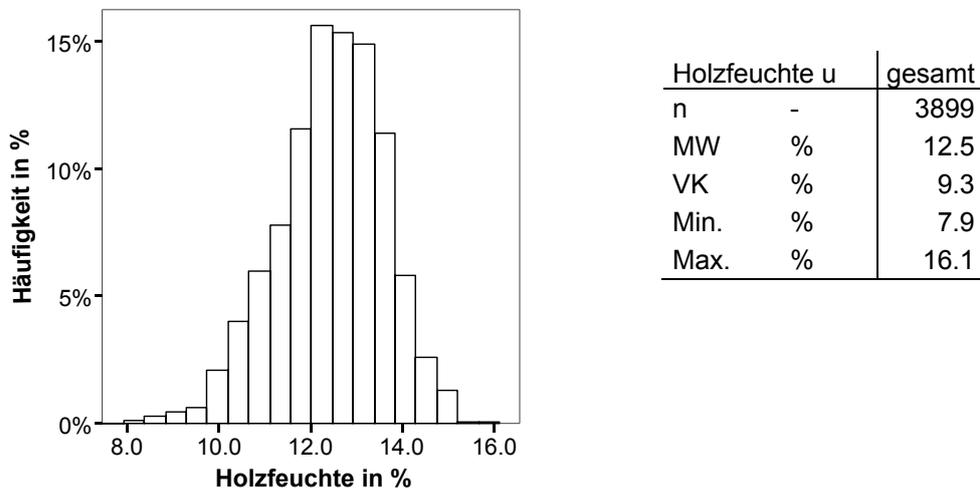


Abb. 4.7: Häufigkeitsverteilung und Kennwerte der Holzfeuchte, n = 3899 PK.

Von der Holzfeuchte unbeeinflusst bleiben alle an der Darr-Rohdichtescheibe erfassten Holzeigenschaften (Darr-Rohdichte, Jahrringbreite, Druckholzanteil, Markabstand, Jahrringlage). Auch die Holzabmessungen sind von der Holzfeuchte weitgehend unbeeinflusst, da die Holzfeuchte nur in geringem Rahmen streut und die Änderungen der Holzabmessungen mit der Holzfeuchte in diesem Bereich vernachlässigbar gering sind. Weil sich die Holzabmessungen mit der Holzfeuchte nur wenig ändern, bleiben auch die Ästigkeiten von einer Holzfeuchteänderung unbeeinflusst. Deshalb wird die Holzfeuchte bei den geometrischen und den materialspezifischen Einflüssen nicht berücksichtigt. Die holzfeuchte-korrigierte Biegefestigkeit wird im Rahmen dieser Arbeit ab Kap. 5 verwendet, um einen möglichen Einfluss der Holzfeuchte auf die zu ermittelnden Größeneffekte auszuschließen.

4.3.3 Einfluss der Darr-Rohdichte

Tab. 4.2 zeigt, dass die Biegefestigkeit mit der Darr-Rohdichte höher korreliert als mit der Prüfkörper-Rohdichte. Dies kann unterschiedliche Ursachen haben: Die Prüfkörper-Rohdichte beinhaltet sowohl einen Einfluss der Holzfeuchte als auch einen Einfluss von Ästen. Da beide Größen streuen, ist die Streuung der Prüfkörper-Rohdichte nicht unabhängig von diesen beiden Größen, was zu einer geringeren Korrelation zwischen Biegefestigkeit und Prüfkörper-Rohdichte führen kann. Aufgrund des höheren Korrelationskoeffizienten wird für die weiteren Untersuchungen die Darr-Rohdichte verwendet.

Die verteilungsfrei ermittelte Korrelation zwischen Darr-Rohdichte und Prüfkörper-Rohdichte ist erwartungsgemäß sehr hoch ($r_{SP} = 0.95$). Die Darr-Rohdichte der 3899 Prüfkörper streut zwischen

$\rho_0 = 289 \text{ kg/m}^3$ und $\rho_0 = 663 \text{ kg/m}^3$ mit einem Mittelwert von $\rho_0 = 421 \text{ kg/m}^3$ und einem Variationskoeffizient von 11 %. Abb. 4.8 zeigt den Einfluss der Darr-Rohdichte auf die Biegefestigkeit. Bei einem Korrelationskoeffizienten von $r_{SP} = 0.48$ erklärt die Darr-Rohdichte $r_{sp}^2 \cdot 100 \% = 23 \%$ der Streuung der Biegefestigkeit für die 3899 Prüfkörper.

Tab. 4.2: Korrelationskoeffizienten r_{SP} zwischen der Biegefestigkeit, der Darr-Rohdichte und der Prüfkörper-Rohdichte, ($n = 3899 \text{ PK}$ und $n = 3549 \text{ PK}$).

		n	f_m N/mm ²	ρ_0 kg/m ³
ρ_0	kg/m ³	3899	0.48	1.00
ρ_{PK}	kg/m ³	3549	0.42	0.95

Anmerkung: Abkürzungen siehe Abkürzungsverzeichnis S. xvii - xviii

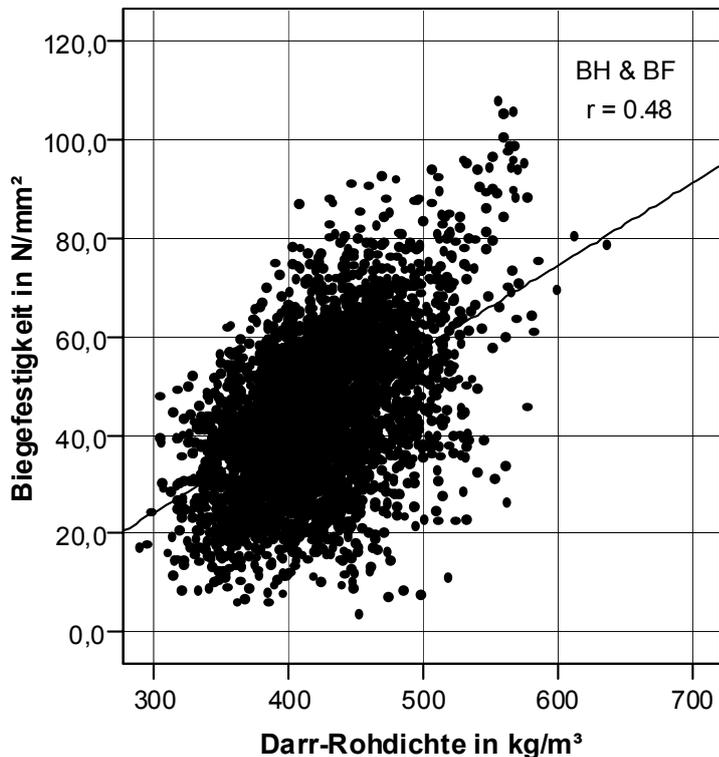


Abb. 4.8: Biegefestigkeit über Darr-Rohdichte, $n = 3899 \text{ PK}$.

4.3.4 Einfluss der Jahrringbreite

Abb. 4.9 zeigt den Einfluss der Jahrringbreite auf die Biegefestigkeit. Sowohl die Biegefestigkeit als auch die Streuung der Biegefestigkeit nehmen mit zunehmender Jahrringbreite ab. Mit einem Korrelationskoeffizienten von $r_{SP} = -0.45$ erklärt die Jahrringbreite 20 % der Streuung der Biegefestigkeit für die 3899 Prüfkörper.

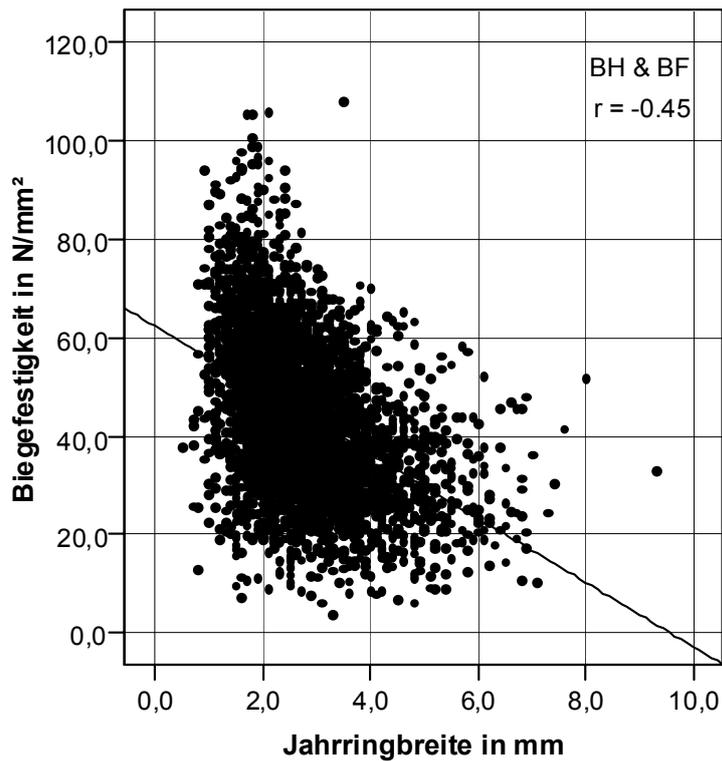


Abb. 4.9: Biegefestigkeit über Jahrringbreite, $n = 3899$ PK.

4.3.5 Einfluss des Druckholzanteils

Abb. 4.10 zeigt den Einfluss des Druckholzanteils auf die Biegefestigkeit. Der geringe Korrelationskoeffizient ($r_{SP} = 0.05$) zeigt, dass Druckholz die Biegefestigkeit offenbar nicht wesentlich beeinflusst.

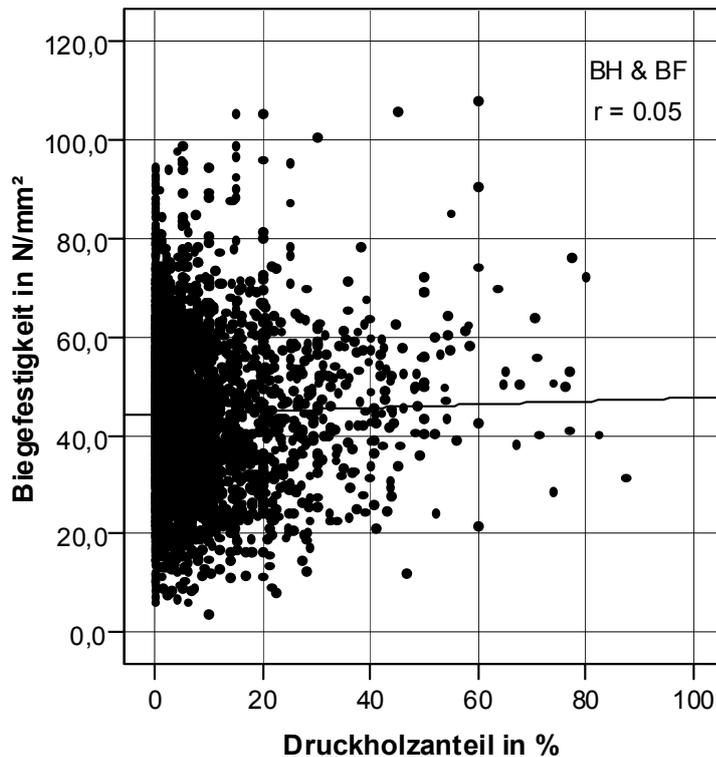


Abb. 4.10: Biegefestigkeit über Druckholzanteil, $n = 3899$ PK.

4.3.6 Einfluss weiterer Holzeigenschaften

Abb. 4.11 zeigt, dass die Biegefestigkeit im Mittel mit zunehmendem Markabstand zunimmt. Dies stimmt mit der Erkenntnis überein, dass die Rohdichte von Nadelholz im Stamm von innen nach außen zunimmt und mit steigender Rohdichte die Biegefestigkeit zunimmt (Abb. 4.8). Der Markabstand erklärt hier 2 % der Streuung der Biegefestigkeit.

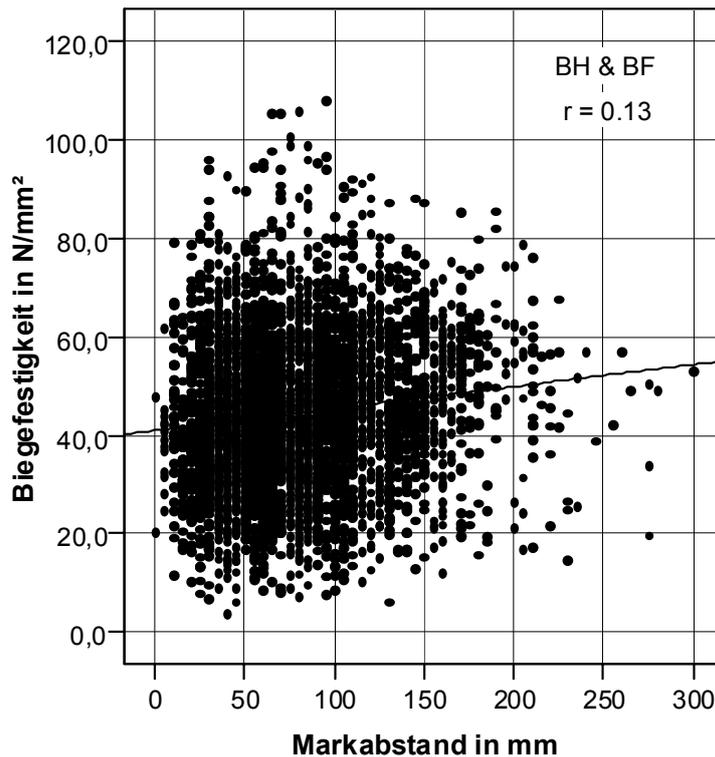


Abb. 4.11: Biegefestigkeit über Markabstand, n = 3899 PK.

Abb. 4.12 zeigt die Verteilung der Biegefestigkeitswerte unterteilt nach Jahrringlage entsprechend Abb. 3.14. Die Boxen umschließen 50 % aller Werte zwischen dem 25%- und dem 75%-Quantil der Biegefestigkeit innerhalb der jeweiligen Jahrringlage. Der Median ist gesondert gekennzeichnet. Tab. 4.3 gibt einen Überblick über den Einfluss der Jahrringlage auf die Biegefestigkeitswerte. Erwartungsgemäß sind die Mittelwerte der Biegefestigkeit für die in der Mitte oder in der Zugzone markhaltigen Prüfkörper am geringsten. Prüfkörper mit Mark weisen aufgrund des juvenilen Holzes im Markbereich tendenziell eine geringere Rohdichte auf als markfreie Prüfkörper. Die mit 45 Grad oder mit stehender Jahrringlage eingeschnittenen Prüfkörper weisen im Mittel die größten Biegefestigkeitswerte auf, da diese Jahrringlagen tendenziell durch markfernen Einschnitt erzeugt werden. Allerdings werden auch diese Ergebnisse durch sämtliche anderen Holzeigenschaften überlagert.

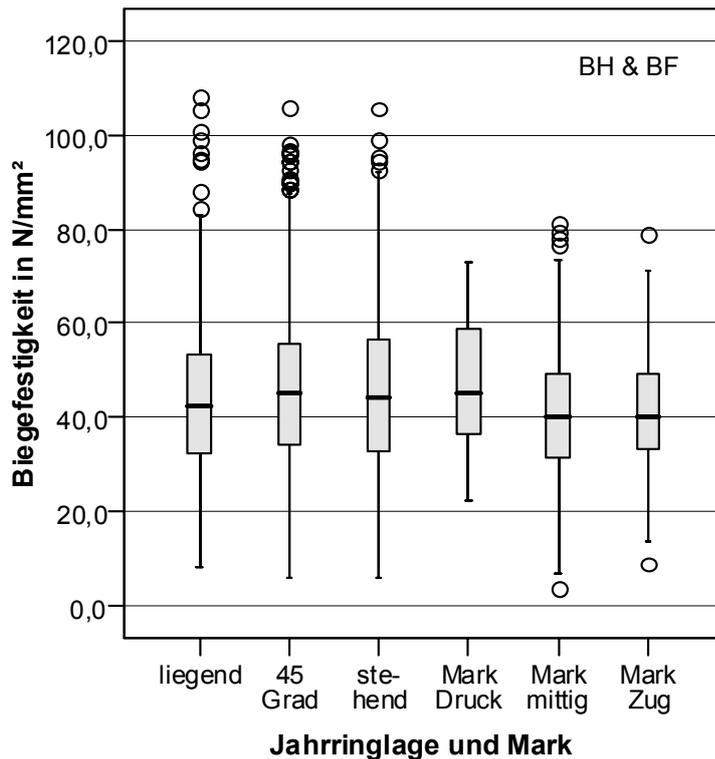


Abb. 4.12: Biegefestigkeit für unterschiedliche Jahrringlagen, n = 3899 PK.

Tab. 4.3: Einfluss der Jahrringlage auf die Biegefestigkeit, n = 3899 PK.

jrl	n	f_m			
		MW N/mm ²	VK %	Min. N/mm ²	Max. N/mm ²
-	-	-	-	-	-
liegend	651	43.6	36	8.1	108.2
45 Grad	1694	45.6	34	6.2	106.0
stehend	1023	44.6	37	6.1	105.5
Mark Druck	51	46.7	29	22.6	72.9
Mark mittig	397	40.6	32	3.7	81.0
Mark Zug	83	42.3	34	8.9	78.9

Anmerkung: Abkürzungen siehe Abkürzungsverzeichnis S. xvii - xviii

Abb. 4.13 zeigt in Anlehnung an Abb. 2.4 die Anteile der unterschiedlichen Versagensarten für die 3899 Biegeprüfkörper sowohl unsortiert als auch sortiert nach DIN 4074-1. 47 % aller Prüfkörper weisen bei Biegung Sprödbrüche auf. 53 % aller Prüfkörper weisen duktile oder wiederverfestigende Brüche auf, die streng genommen durch die WEIBULL-Theorie nicht abgebildet werden können. Vor allem hochwertige Schnitthölzer versagen duktil, was eventuell einen Einfluss der Sortierklasse auf den Größeneffekt nach WEIBULL hervorrufen könnte. Spröde Versagensmechanismen weisen im Mittel geringere Biegefestigkeitswerte auf ($f_{m,mean,spröde} = 40.3 \text{ N/mm}^2$) als duktile ($f_{m,mean,duktile} = 52.3 \text{ N/mm}^2$) oder wieder-

verfestigende Versagensmechanismen ($f_{m,mean,wiederverfestigend} = 40.6 \text{ N/mm}^2$). Diese Unterschiede können sortierklassenbedingt sein und sind nicht auf einen Größeneffekt zurückzuführen.

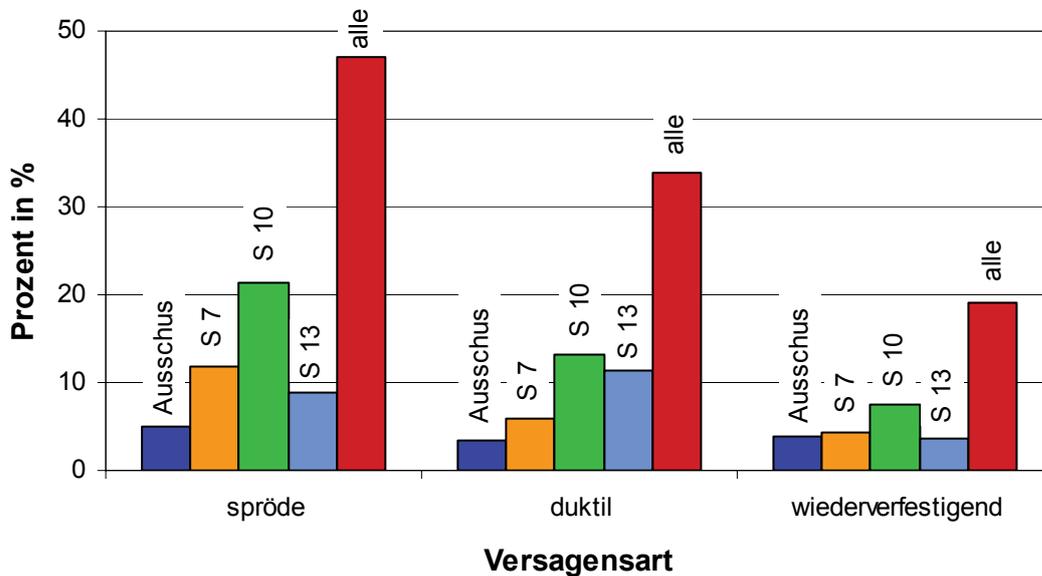


Abb. 4.13: Verteilung der Versagensarten bei Biegeprüfkörpern sortiert nach DIN 4074-1 und unsortiert, $n = 3899$ PK.

4.3.7 Wechselwirkungen der Holzeigenschaften untereinander

Die einzelnen Holzeigenschaften sind nicht unabhängig voneinander. Um die materialspezifischen Einflüsse der einzelnen Holzeigenschaften auf die Biegefestigkeit richtig zu beurteilen, müssen neben den Korrelationen mit der Biegefestigkeit die Wechselwirkungen der Holzeigenschaften untereinander bekannt sein. Sind diese bekannt, können sie bei der Modellierung des Größeneffektes berücksichtigt werden. Die Wechselwirkungen können anhand aller 6244 Biege- und Zugprüfkörper untersucht werden (Tab. 3.1, Abb. 3.4), da sie nicht von der Prüfart beeinflusst werden. Der Markabstand wurde nur für die Biegeprüfkörper erfasst, weshalb die Korrelationen mit dem Markabstand weiterhin auf 3899 Prüfkörper bezogen werden. Tab. 4.4 zeigt die verteilungsfrei ermittelten Korrelationskoeffizienten r_{SP} der Holzeigenschaften untereinander, wobei die sonstigen biologischen Faktoren aufgrund ihres seltenen Auftretens nicht aufgeführt werden.

Tab. 4.4: Korrelationskoeffizienten r_{SP} der Holzeigenschaften untereinander, $n = 6244$ PK und $n = 3899$ PK.

		n	tKAR	mKAR	ρ_0	jrb	dh	m	jrl
		-	-	-	kg/m ³	mm	%	mm	-
n	-	6244	6244	6244	6244	6244	6244	3899	6244
tKAR	-	6244	1.00	0.75	-0.28	0.28	-0.05	-0.31	-0.17
mKAR	-	6244		1.00	-0.20	0.18	-0.02	-0.12	0.02
ρ_0	kg/m ³	6244			1.00	-0.60	0.12	0.19	0.14
jrb	mm	6244				1.00	0.16	-0.19	-0.12
dh	%	6244					1.00	0.07	0.06
m	mm	3899						1.00	0.44
jrl	-	6244							1.00

Anmerkung: Abkürzungen siehe Abkürzungsverzeichnis S. xvii - xviii

Die Ästigkeit tKAR korreliert mit $r_{SP} = 0.75$ sehr hoch mit der Ästigkeit mKAR. Es ist davon auszugehen, dass Prüfkörper mit einer hohen Ästigkeit im Querschnitt auch eine hohe Ästigkeit im äußeren Viertel aufweisen. Abb. 4.14 zeigt diesen Zusammenhang graphisch. Aus der Bedingung, dass der tKAR mindestens 1/4 des mKAR oder größer sein muss, ergibt sich die scharfe untere Streugrenze.

Beim Zusammenhang zwischen tKAR und mKAR muss berücksichtigt werden, dass der Maximalwert des tKAR und der Maximalwert des mKAR nicht zwangsläufig an der gleichen Stelle im Prüfkörper liegen müssen. In Abb. 4.14 sind bei 66 % der Prüfkörper die Astkoordinaten für tKAR und mKAR identisch, 4 % der Prüfkörper sind astfrei. Um zu überprüfen, ob an der gleichen Längskoordinate berechnete Astwerte eine bessere Korrelation zur Biegefestigkeit liefern, wird an der Längskoordinate des maximalen tKAR der zugehörige mKAR und an der Längskoordinate des maximalen mKAR der zugehörige tKAR ermittelt. Erwartet wird, dass die an den gleichen Längskoordinaten berechneten Ästigkeiten kleinere Korrelationskoeffizienten zur Biegefestigkeit aufweisen als die unabhängig von der Längskoordinate ermittelten Werte. Tab. 4.5 bestätigt diese Erwartung. Deshalb werden im Weiteren die Ästigkeiten tKAR und mKAR unabhängig von ihrer Längskoordinate verwendet. Da die Korrelation der ortsunabhängigen Ästigkeiten tKAR und mKAR mit $r_{SP} = 0.75$ in der gleichen Größenordnung wie die Korrelation der Ästigkeit tKAR mit der an der gleichen Längskoordinate berechneten Ästigkeit mKAR ($r_{SP} = 0.74$) und die Korrelation der Ästigkeit mKAR mit der an der gleichen Längskoordinate berechneten Ästigkeit tKAR ($r_{SP} = 0.73$) liegen, kann gefolgert werden, dass der Zusammenhang zwischen den Ästigkeiten des gesamten Querschnitts und der Ästigkeit im äußeren Viertel des Querschnitts unabhängig von der Längskoordinate ist.

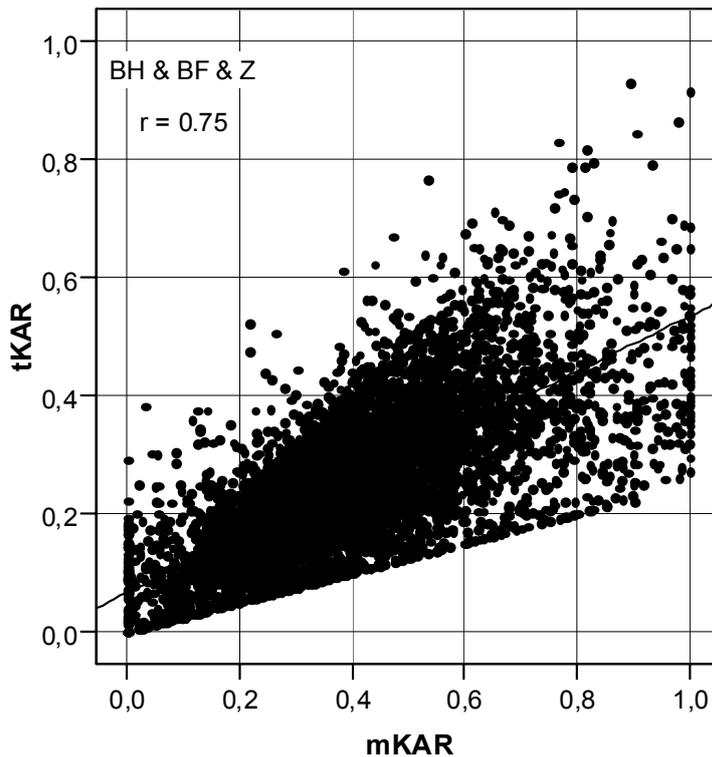


Abb. 4.14: Ästigkeit tKAR über Ästigkeit mKAR, n = 6244 PK.

Tab. 4.5: Korrelationskoeffizienten r_{SP} der Biegefestigkeit und der Ästigkeiten tKAR und mKAR in Abhängigkeit der Längskoordinaten n = 6244 PK.

		f_m	tKAR ortsun- abhängig	mKAR an der Stelle des tKAR berechnet	mKAR ortsun- abhängig	tKAR an der Stelle des mKAR berechnet
		N/mm ²	-	-	-	-
f_m	N/mm ²	1.00	-0.58	-0.54	-0.59	-0.53
tKAR	ortsunabhängig	-	1.00	0.74	0.75	0.94
mKAR	an der Stelle des tKAR berechnet	-	-	1.00	0.91	0.77
mKAR	ortsunabhängig	-	-	-	1.00	0.73
tKAR	an der Stelle des mKAR berechnet	-	-	-	-	1.00

Anmerkung: Abkürzungen siehe Abkürzungsverzeichnis S. xvii - xviii

Die Abnahme der Ästigkeit mit zunehmender Darr-Rohdichte (Tab. 4.4) kann über die Lage des Schnittholzes im Stammquerschnitt erklärt werden. Mit zunehmendem Markabstand nehmen der Anteil an Ästen am Stammumfang und damit die Ästigkeit ab (Abb. 4.15). Abb. 4.16 zeigt, dass mit zunehmendem Markabstand die Darr-Rohdichte zu- und die Jahrringbreite abnimmt. Da mit zunehmender Darr-Rohdichte der Markabstand zunimmt, muss mit zunehmender Darr-Rohdichte die Ästigkeit abnehmen.

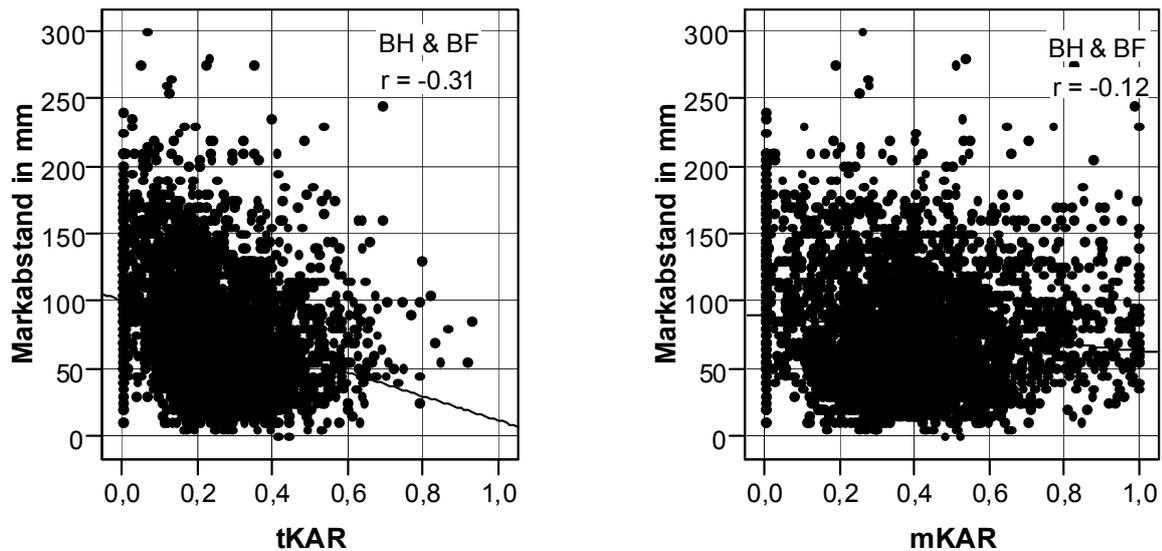


Abb. 4.15: Markabstand über Ästigkeit tKAR und Markabstand über Ästigkeit mKAR, n = 3899 PK.

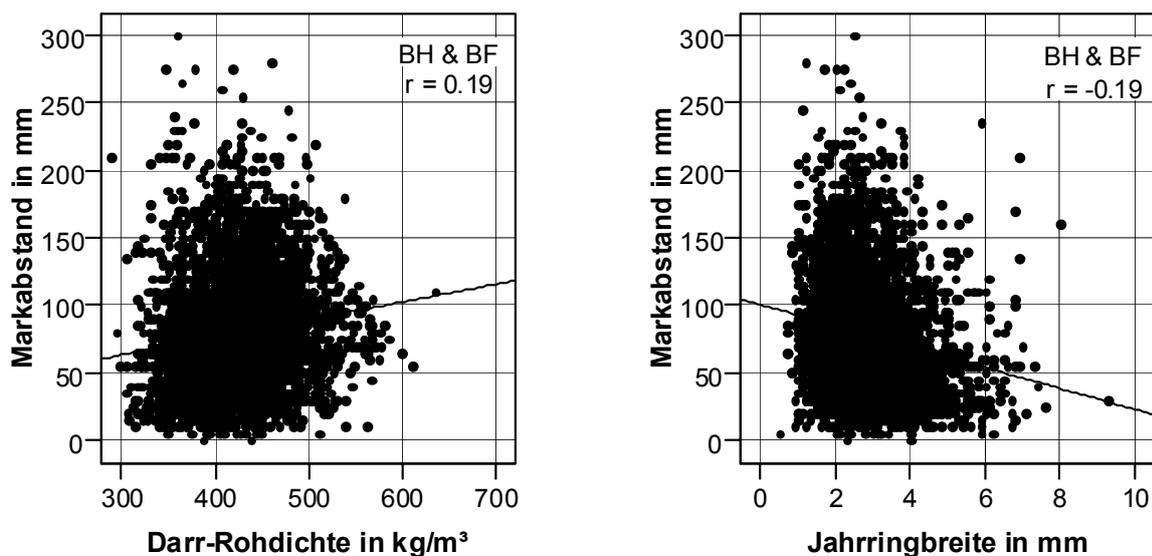


Abb. 4.16: Markabstand über Darr-Rohdichte und Markabstand über Jahrringbreite, n = 3899 PK.

Darr-Rohdichte und Jahrringbreite korrelieren mit $r_{SP} = -0.60$ sehr hoch. Mit zunehmender Darr-Rohdichte nimmt die Jahrringbreite ab (Abb. 4.17). Die Darr-Rohdichte wird vor allem vom Spätholzanteil im Jahrring bestimmt. Unterschiedliche Jahrringbreiten entstehen bei Fichte primär aufgrund unterschiedlich breiter Frühholzbereiche, deren Breite die Vegetationsperiode widerspiegelt. Die Breite der Spätholzbereiche bleibt von der Vegetationsperiode weitgehend unbeeinflusst. Deshalb führen kleine Jahrringbreiten mit einem im Verhältnis zur Jahrringbreite großen Spätholzanteil zu einer Erhöhung der Darr-Rohdichte. Da Jahrringbreite und Darr-Rohdichte stark korrelieren, ergeben sich zwischen Ästigkeit und Jahrringbreite ähnlich hohe Korrelationskoeffizienten wie zwischen Ästigkeit und Darr-Rohdichte.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit zunehmendem Markabstand die Ästigkeit ab- und die Rohdichte zunimmt. Da Jahrringbreite und Darr-Rohdichte negativ korrelieren, müssen mit zunehmender Jahrringbreite die Ästigkeit zu- und der Markabstand abnehmen.

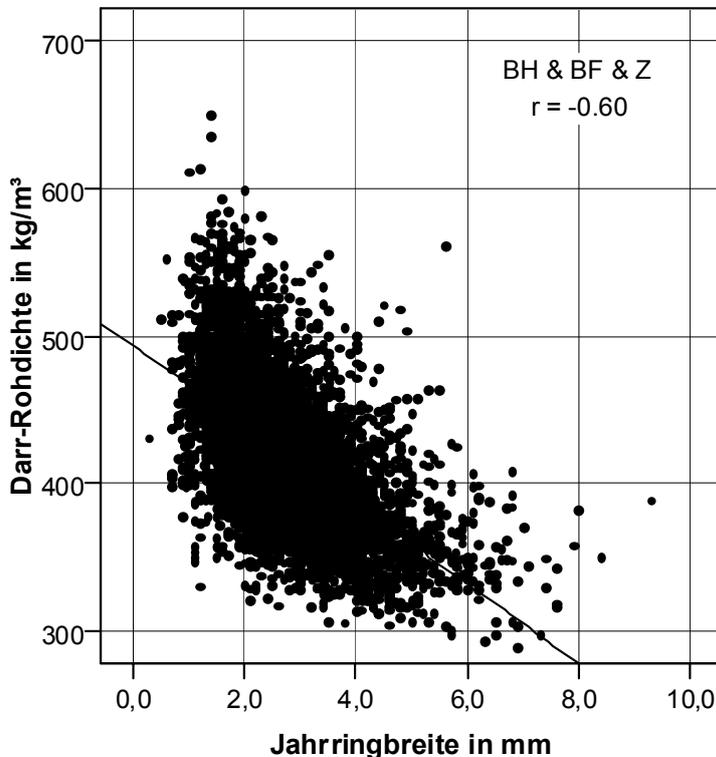


Abb. 4.17: Darr-Rohdichte über Jahrringbreite, n = 6244 PK.

Der Druckholzanteil korreliert am stärksten mit der Jahrringbreite, gefolgt von der Darr-Rohdichte. Da Druckholzbereiche einen höheren Spätholzanteil aufweisen (Kap. 3.3.6), nimmt die Darr-Rohdichte mit zunehmendem Druckholzanteil zu. Weil Druckholzbereiche breitere Jahrringe aufweisen (Kap. 3.3.6), muss die Jahrringbreite mit zunehmendem Druckholzanteil zunehmen. Ein erhöhter Druckholzanteil führt also dazu, dass sowohl Jahrringbreite als auch Darr-Rohdichte zunehmen. Interessant ist auch die positive Korrelation zwischen Markabstand und Druckholzanteil: Mit zunehmendem Markabstand nimmt der Druckholzanteil zu. Bäume verstärken aufgrund äußerer Einwirkungen vornehmlich die Randbereiche des Stammdurchmessers, da die Verstärkung aufgrund des Hebelarmes in den Randbereichen am wirksamsten ist.

Die Jahrringlage wird als nominale Variable in die Korrelationsmatrix aufgenommen. Die Korrelationen geben nur qualitative Zusammenhänge wider. Die Jahrringlage steht in engem Zusammenhang mit dem Markabstand. Markfern eingeschnittene Prüfkörper weisen meist stehende Jahrringlagen oder Jahrringlagen unter einem Winkel von 45 Grad auf. Auch die Ästigkeit t_{KAR} bleibt von der Jahrringlage nicht unbeeinflusst, da Äste radial zu den Jahrringen verlaufen. Die Jahrringlage beeinflusst auch den Zusammenhang zwischen t_{KAR} und m_{KAR} der 3899 Biegeprüfkörper deutlich (Abb. 4.18). Die Jahrring-

lagen „Mark im Zugbereich“ und „Mark im Druckbereich“ sind nicht abgebildet, da diese Kollektive nur 83 bzw. 51 Prüfkörper aufweisen.

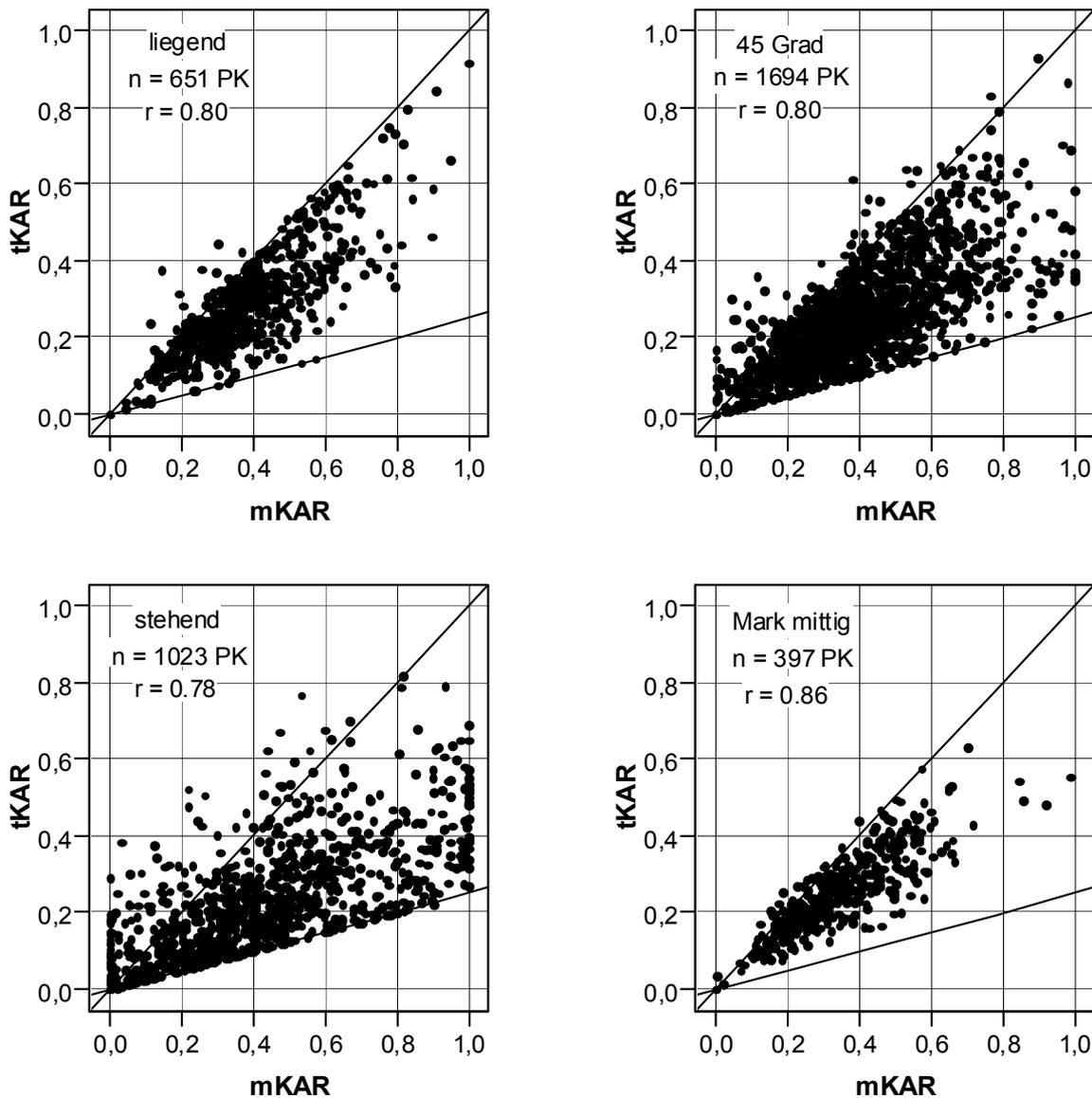


Abb. 4.18: Einfluss der Jahrringlage auf den Zusammenhang zwischen tKAR und mKAR, n = 3899 PK.

Bei im äußeren Viertel liegenden Jahrringen unterscheiden sich die Ästigkeiten tKAR und mKAR weniger als bei im äußeren Viertel stehenden Jahrringen. Bei im äußeren Viertel liegenden Jahrringen durchläuft der Ast tendenziell einen großen Teil der Querschnittshöhe, so dass die Verhältnswerte von Astfläche zu Querschnittsfläche sowohl für die gesamte Querschnittsfläche als auch im äußeren Viertel ähnlich sind. Bei im äußeren Viertel stehenden Jahrringen kann ein Ast die Querschnittsfläche durchlaufen, ohne entweder in der inneren Hälfte oder in den äußeren Vierteln zu erscheinen, weshalb vermehrt Prüfkörper mit einem Verhältnis von $tKAR/mKAR = 1/4$ oder einem Verhältnis von $tKAR/mKAR > 1$ auftreten. Für die Jahrringlage „45 Grad“ sind diese Zusammenhänge abhängig vom Astbild und stellen eine Kombination aus liegenden und stehenden Jahrringen dar. Ist der Prüfkörper markhaltig, verhalten sich die Ästigkeiten

entsprechend je nach Jahrringlage. Bei markhaltigen Prüfkörpern fehlen große Ästigkeiten, da Äste im Markbereich zahlreich, aber klein sind.

Die Einflüsse der Jahrringlage auf die Darr-Rohdichte und die Jahrringbreite sind über die Querschnittsgröße des Prüfkörpers gekoppelt. Diese Zusammenhänge werden in Kap. 4.4 dargestellt.

4.4 Einfluss der Holzabmessungen auf die Holzeigenschaften (geometrische Einflüsse)

Die Holzeigenschaften können durch eine Veränderung der Holzabmessungen beeinflusst werden. Zur Bestimmung des Größeneffektes bei Biegebeanspruchung ist es wichtig, diese Zusammenhänge zu kennen, da z.B. querschnittsbedingte Änderungen der Holzeigenschaften den Größeneffekt verändern. Es spielen sowohl die Querschnittsbreite und die Querschnittshöhe als auch die Stützweite bzw. die Schnittholzlänge eine entscheidende Rolle. In Anlehnung an Kap. 4.3 werden die Einflüsse der Querschnittsabmessungen auf die Holzeigenschaften Ästigkeit, Darr-Rohdichte, Jahrringbreite, Druckholz, Markabstand und Jahrringlage anhand aller zur Verfügung stehenden 6244 Schnittholzdaten diskutiert. Tab. 4.6 fasst die entsprechenden Korrelationskoeffizienten zusammen. Die biologischen Faktoren sind in Tab. 4.6 nicht aufgeführt, da sie von den Holzabmessungen wenig bis gar nicht abhängig sind.

Tab. 4.6: Korrelationskoeffizienten r_{SP} zwischen Holzabmessungen und Holzeigenschaften, $n = 6244$ PK und $n = 3899$ PK.

		n	b	h	s
		-	mm	mm	mm
n	-	6244	6244	6244	6244
tKAR	-	6244	-0.20	-0.21	-0.25
mKAR	-	6244	-0.24	-0.14	-0.19
ρ_0	kg/m ³	6244	0.00	-0.04	-0.04
jrb	mm	6244	0.00	-0.03	-0.02
dh	%	6244	0.09	0.05	0.07
m	mm	3899	-0.04	-0.02	-0.01
jrl	-	6244	0.01	-0.16	-0.10

Anmerkung: Abkürzungen siehe Abkürzungsverzeichnis S. xvii - xviii

Die Ästigkeiten nehmen im Mittel sowohl mit zunehmenden Querschnittsabmessungen als auch mit zunehmender Stützweite ab (Abb. 4.19 und Abb. 4.20): Bei Fichte sind die Astdurchmesser begrenzt, weshalb die Ästigkeit mit zunehmenden Querschnittsabmessungen abnimmt. Da mit zunehmender Prüfkörperlänge auch die Höhe und vielfach die Breite zunehmen, nimmt auch dabei die Ästigkeit ab. Darüber hinaus muss folgender Zusammenhang beachtet werden: Schnitthölzer weisen in der Regel eine

Länge zwischen $\ell_{\text{Holz}} = 4000 \text{ mm}$ und $\ell_{\text{Holz}} = 6000 \text{ mm}$ auf (FRONIUS 1982). Mit zunehmender Schnittholzlänge steigt die Wahrscheinlichkeit, dass ein größerer Ast im Prüfkörper auftritt. Je größer allerdings die Querschnittshöhe, desto größer müssen bei Normprüfung die Stützweite und die Kraftweite sein. Mit zunehmender Kraftweite und damit zunehmender Stützweite kann bei der Ausformung des Prüfkörpers der Prüfbereich nicht mehr beliebig gewählt werden. Dies kann dazu führen, dass mit zunehmender Stützweite die maximale Ästigkeit im Prüfkörper abnimmt und somit eine negative Korrelation zwischen Ästigkeit und Stützweite entsteht.

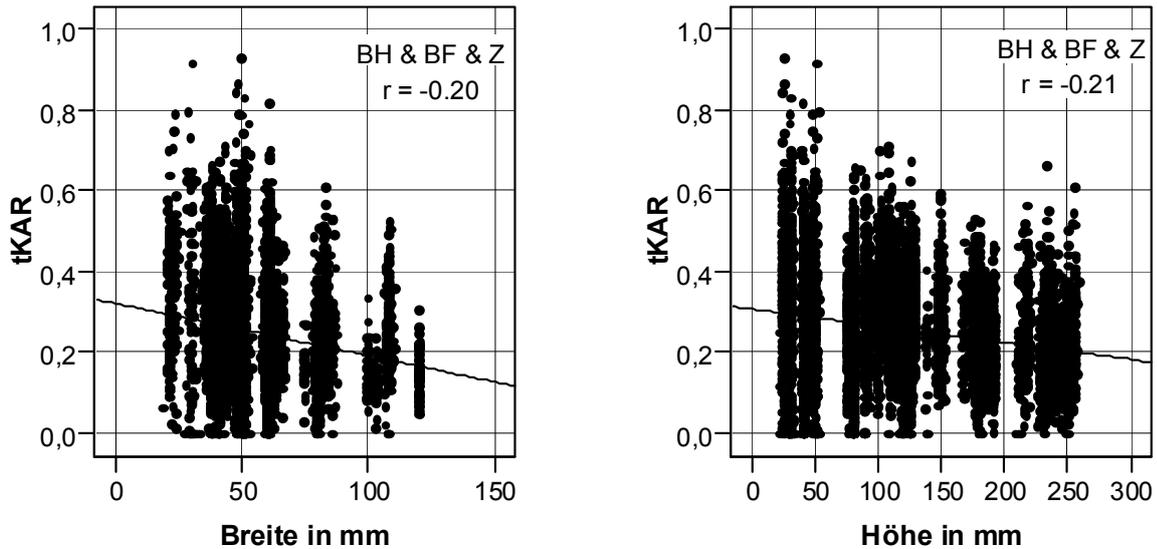


Abb. 4.19: Ästigkeit tKAR über Breite und Ästigkeit tKAR über Höhe, $n = 6244 \text{ PK}$.

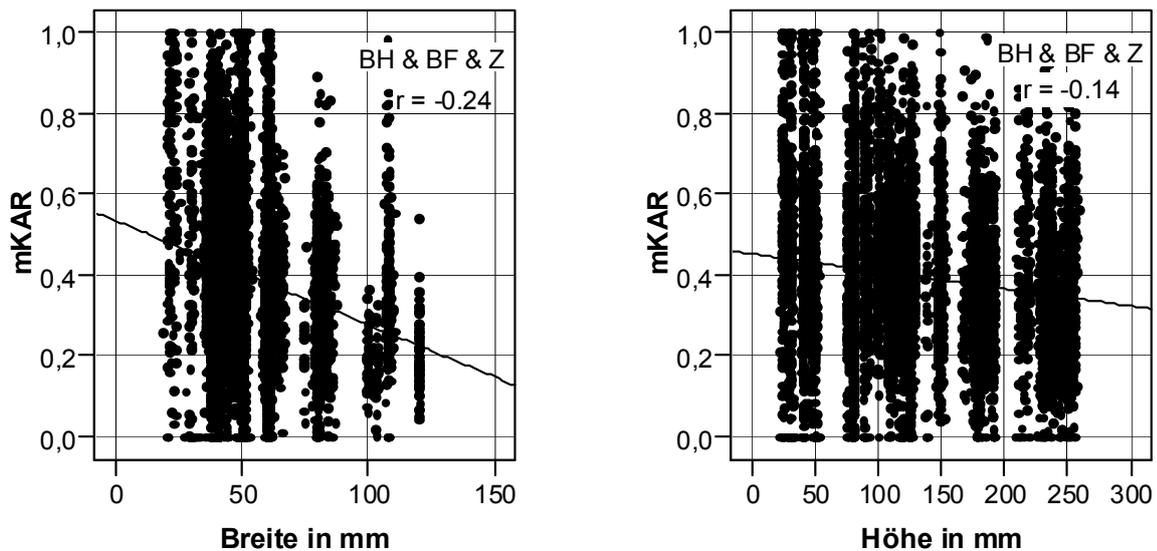


Abb. 4.20: Ästigkeit mKAR über Breite und Ästigkeit mKAR über Höhe, $n = 6244 \text{ PK}$.

Weder die Darr-Rohdichte noch die Jahrringbreite verändern sich mit zunehmender Querschnittsbreite. Mit zunehmender Querschnittshöhe nehmen beide Holzeigenschaften geringfügig ab (Abb. 4.21, Abb. 4.22). Die Veränderungen sind allerdings so gering, dass sie nicht weiter verfolgt werden.

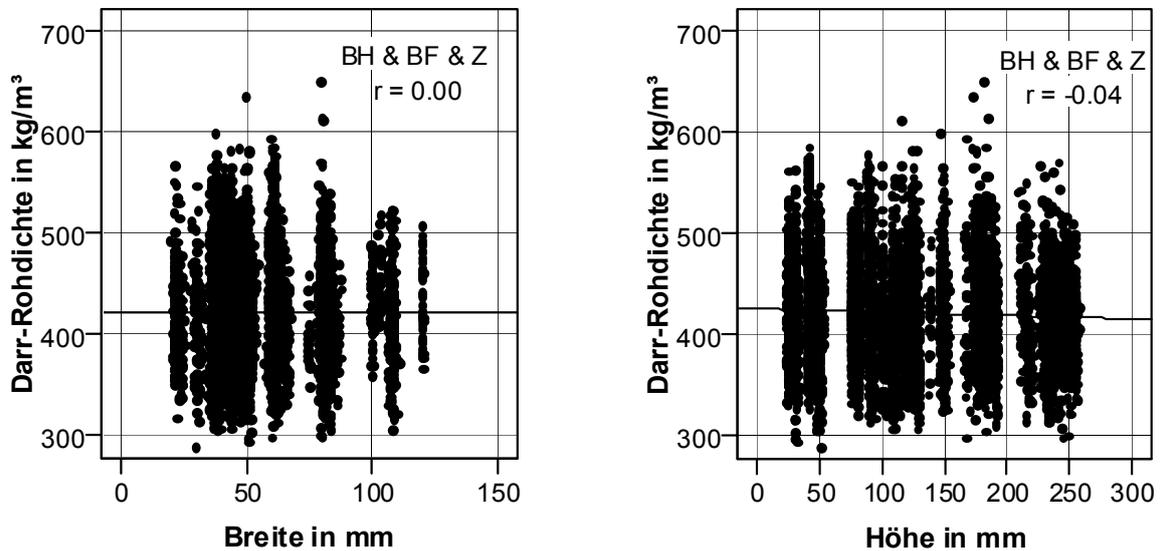


Abb. 4.21: Darr-Rohdichte über Breite und Darr-Rohdichte über Höhe, n = 6244 PK.

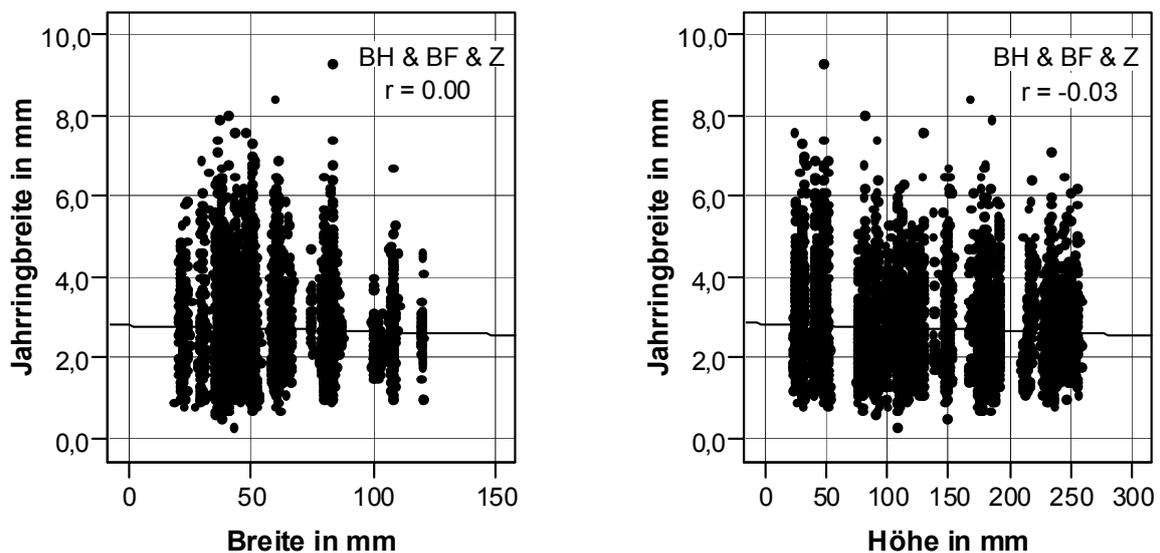


Abb. 4.22: Jahrringbreite über Breite und Jahrringbreite über Höhe, n = 6244 PK.

Der Einfluss der Holzabmessung auf den Druckholzanteil ist ebenfalls sehr gering. Der Druckholzanteil schwankt innerhalb des Baumes sowohl in longitudinaler als auch in radialer Richtung sehr stark. Bei größeren Querschnitten nimmt die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein druckholzhaltiger Bereich im Prüfkörper befindet, zu.

Der Markabstand und die Jahrringlage sind unmittelbar mit dem Einschnittbild verknüpft. Über das Einschnittbild lassen sich der geometrische Einfluss der Holzabmessungen auf die Holzeigenschaften und der materialspezifische Einfluss der Holzeigenschaften auf die Biegefestigkeit gedanklich am einfachsten verknüpfen. Der Schnittholzquerschnitt und die Schnittholzlänge bestimmen in gewissem Rahmen die Lage im Stammquerschnitt (Abb. 4.23). Durch die Abholzigkeit des Stammes müssen Schnitthölzer mit zunehmender Länge zunehmend marknah eingeschnitten werden. Dadurch werden alle querschnittsrelevanten Parameter wie Ästigkeit, Darr-Rohdichte, Jahrringbreite, Druckholzanteil, Markabstand und Jahrringlage durch die Schnittholzlänge beeinflusst. Sehr große Querschnitte können bei markfreiem Einschnitt fast die ganze Stammhälfte abdecken. Die Lage kann im Stammquerschnitt nur wenig variiert werden. Der Prüfkörper enthält sowohl marknahe als auch markferne Bereiche, womit Rohdichte- und Jahrringbreitenunterschiede, die zwischen marknahen und markfernen Bereichen existieren, ausgeglichen werden. Die Holzeigenschaften von Schnittholz mit großen Querschnitten entsprechen tendenziell den mittleren Holzeigenschaften des Stammes. Die Streuung der Holzeigenschaften bei unterschiedlichen Prüfkörpern rührt hauptsächlich aus der Streuung der Holzeigenschaften zwischen unterschiedlichen Stämmen her.

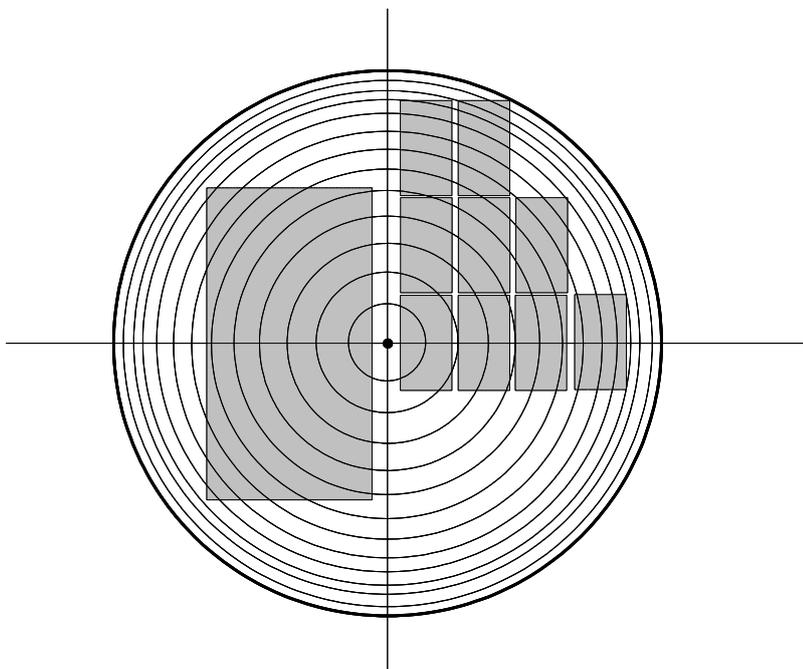


Abb. 4.23: Möglicher Einfluss der Holzabmessungen auf die Lage des Prüfkörpers im Stamm.

Die Holzeigenschaften kleiner Querschnitte variieren ebenfalls von Baum zu Baum. Diese Variation wird zusätzlich von der Variation der Holzeigenschaften innerhalb eines Stammes überlagert: Werden kleine Querschnitte marknah eingeschnitten, sind tendenziell die Darr-Rohdichte geringer und die Jahrringbreite größer als bei markfernem Einschnitt. Die Streuung der Biegefestigkeiten kleiner Schnittholzquerschnitte müsste somit die Streuung der Biegefestigkeit großer Schnittholzquerschnitte übersteigen. Abb. 4.24 verdeutlicht dies und zeigt darüber hinaus, dass die Biegefestigkeit im Mittel mit zunehmender Querschnittsgröße abnimmt.

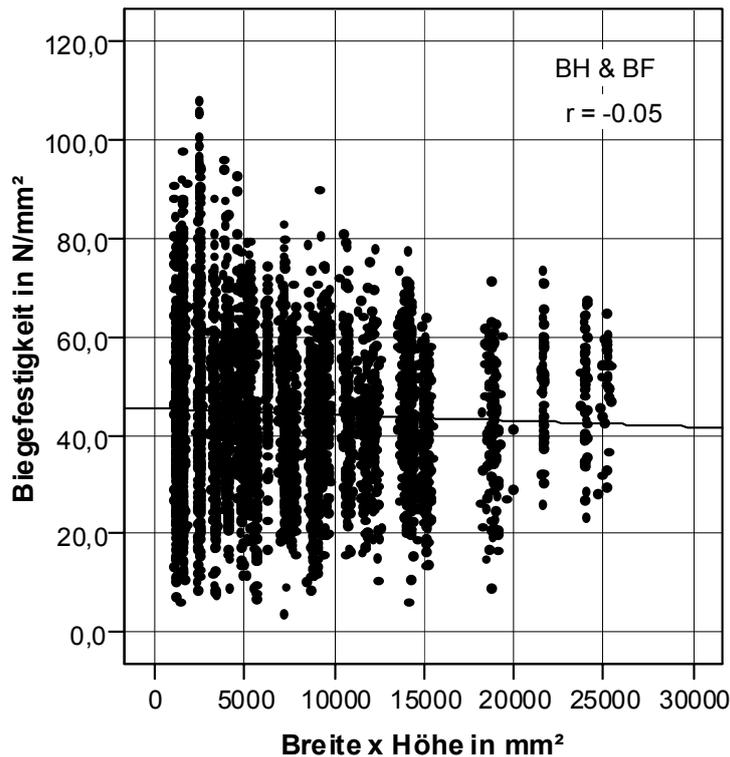


Abb. 4.24: Biegefestigkeit über Schnittholzquerschnitt, n = 3899 PK.

Darüber hinaus beeinflusst der Stammdurchmesser die Einschnittmöglichkeiten. Der Stammdurchmesser wird vielfach in Abhängigkeit von den jeweiligen Schnittholzabmessungen gewählt. Üblicherweise werden kleine Querschnitte eher aus Stämmen mit kleinen Durchmessern, große Querschnitte eher aus Stämmen mit großen Durchmessern gewonnen. Kleine Stammdurchmesser besitzen im Mittel geringere Rohdichten und größere Jahrringbreiten als große Stammdurchmesser. Dieser Zusammenhang zwischen Schnittholzabmessungen, dem Stammdurchmesser und der Lage des Querschnitts im Stamm trägt dazu bei, dass kleine Querschnitte eine größere Streuung der Holzeigenschaften und insbesondere auch eine zum Teil geringere Biegefestigkeit aufweisen können als große Querschnitte (Abb. 4.24).

Auch die Ästigkeit ist einschnittsabhängig: Im marknahen Bereich wird die Ästigkeit innerhalb eines Schnittholzes klein, aber größer als Null sein; im markfernen Bereich steigt bei Schnittholz mit kleinen Querschnitten die Wahrscheinlichkeit astfreier Prüfkörper. Markfern eingeschnittene kleine Schnitthölzer werden geringere Jahrringbreiten und damit größere Darr-Rohdichten aufweisen. Daraus folgt, dass der Zusammenhang Biegefestigkeit – Markabstand für Schnittholz mit kleinen Querschnitten ausgeprägter sein muss als für Schnittholz mit großen Querschnitten. Abb. 4.25 bestätigt dies.

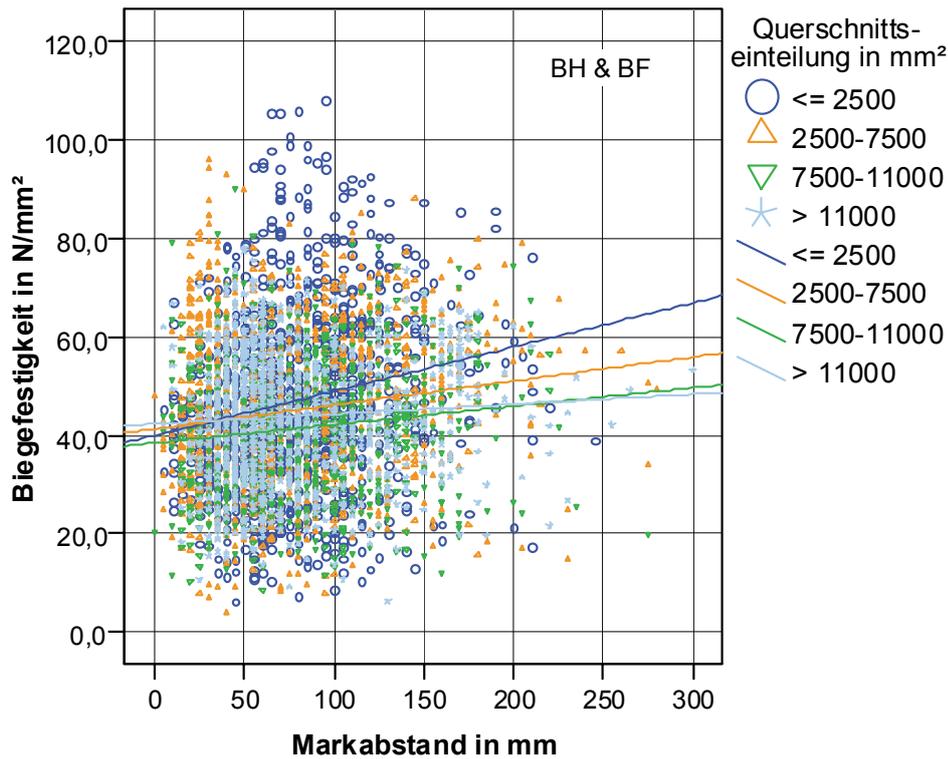


Abb. 4.25: Biegefestigkeit über Markabstand unterteilt in Querschnittsgröße, n = 3899 PK.

Diese Überlegungen machen die komplexen Zusammenhänge deutlich, denen die Biegefestigkeit unterliegt. Um in Kap. 5 klären zu können, ob und wie stark sich die Holzabmessungen direkt auf die Biegefestigkeit auswirken und inwieweit die geometrischen und materialspezifischen Einflüsse zu einem indirekten Einfluss der Holzabmessungen auf die Biegefestigkeit führen, werden in Kap. 4.5 die erarbeiteten Abhängigkeiten nochmals tabellarisch zusammengefasst.

4.5 Zusammenfassung der Zusammenhänge zwischen Holzabmessungen, Holzeigenschaften und Biegefestigkeit

In Tab. 4.7 sind die wesentlichen, in diesem Kapitel erläuterten Abhängigkeiten qualitativ dargestellt. Auf diesen Erkenntnissen aufbauend wird der Größeneffekt bei biegebeanspruchtem Fichtenschnittholz in den folgenden Kapiteln untersucht.

Tab. 4.7: Abhängigkeiten zwischen der Biegefestigkeit, den Holzabmessungen und den Holzeigenschaften.

	f_m	b	h	s	tKAR	mKAR	u	ρ_0	jrb	dh	m	jrl	biolog.
Biegefestigkeit f_m		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Breite b			x	✓	✓	✓	x	x	x	✓	✓	x	x
Höhe h				✓	✓	✓	x	x	x	✓	✓	✓	x
Stützweite s					✓	✓	x	x	x	✓	✓	✓	x
Ästigkeit tKAR						✓	x	✓	✓	x	✓	✓	x
Ästigkeit mKAR							x	✓	✓	x	✓	✓	x
Holzfeuchte u								x	x	x	x	x	x
Darr-Rohdichte ρ_0									✓	✓	✓	✓	x
Jahrringbreite jrb										✓	✓	✓	x
Druckholzanteil dh											✓	✓	x
Markabstand m												✓	x
Jahrringlage jrl													x
biol. Faktoren biolog.													x

✓ = die Parameter werden als voneinander abhängig betrachtet

x = die Parameter werden als voneinander unabhängig betrachtet

Anmerkung: Abkürzungen siehe Abkürzungsverzeichnis S. xvii - xviii

5. Der Größeneffekt bei Standardbedingungen

5.1 Definitionen

Unter Einbeziehung der in Kap. 4 hergeleiteten Abhängigkeiten wird in diesem Kapitel der Einfluss der Holzabmessungen auf die Biegefestigkeit untersucht. Dabei ist es wichtig, die Bedingungen, unter denen die Biegefestigkeit ermittelt wurde, genau zu definieren, da z.B. auch die Prüfanordnung Einfluss auf die zu ermittelnde Biegefestigkeit und damit auf den Größeneffekt haben kann. Tab. 5.1 gibt einen Überblick über die Prüfbedingungen, die die Festigkeit von Schnittholz beeinflussen können.

Tab. 5.1: Definition der unterschiedlichen Prüfbedingungen.

Prüfart	Biegung	...	Biegung hochkant oder Biegung flachkant
Lage der größten Ästigkeit:			
in Längsrichtung	systematisch	...	Lage der größten tKAR-Ästigkeit und damit des kritischen Querschnitts innerhalb der Kraftweite
	zufällig	...	Lage der größten tKAR-Ästigkeit und damit des kritischen Querschnitts innerhalb oder außerhalb der Kraftweite
im Querschnitt	orientiert	...	Lage der größten mKAR-Ästigkeit in der Biegezugzone
	unorientiert	...	Lage der größten mKAR-Ästigkeit in der Biegezug- oder in der Biegedruckzone
Prüfverhältnis	18-h	...	Stützweite / Querschnittshöhe = 18 (bei Biegung)
	sonst	...	Stützweite / Querschnittshöhe = beliebig

Generell wird je nach Beanspruchung zwischen den Prüfarten Biegung, Zug, Druck und Schub unterschieden. Diese Arbeit befasst sich mit der Beschreibung des Größeneffektes bei biegebeanspruchtem Schnittholz, da sich die Festigkeitsprofile in EN 338 auf die Biegefestigkeit beziehen.

Die Festigkeitswerte unterscheiden sich je nach Anordnung des kritischen Querschnitts. Dabei spielt sowohl die Anordnung in Längsrichtung als auch die Anordnung im Querschnitt eine Rolle. EN 384 schreibt vor, dass für die Biegeprüfung ein kritischer Querschnitt bestimmt und zwischen den

Lastangriffspunkten angeordnet werden muss (Kap. 3.3.8). Wird bei der Biegeprüfung der kritische Querschnitt systematisch zwischen den Lastangriffspunkten angeordnet, werden kleinere Festigkeitswerte ermittelt als bei zufälliger Auswahl des zu prüfenden Bereichs in Längsrichtung. Zusätzlich beeinflusst die Lage der größten Ästigkeit im Querschnitt die Biegefestigkeit (GLOS & DENZLER 2004 a). EN 384 schreibt vor, dass bei der Biegeprüfung „die Zugseite nach Zufallsgesichtspunkten“ zu wählen ist (DIN EN 384:2004-05, Abschnitt 5.2). Im Rahmen dieser Arbeit wird zwischen orientierter und unorientierter Astlage unterschieden: Bei orientierter Astlage befindet sich die größte mKAR-Ästigkeit bei allen Biegeprüfkörpern in der Biegezugzone, bei unorientierter Astlage befindet sich die größte mKAR-Ästigkeit entweder in der Biegezug- oder in der Biegedruckzone (Abb. 5.1).

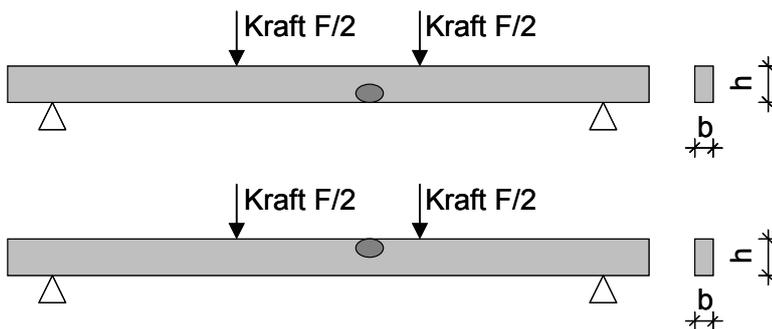


Abb. 5.1: Astlage entsprechend der größten mKAR-Ästigkeit.

Schließlich muss auch das Prüfverhältnis s/h zwischen Stützweite und Querschnittshöhe beachtet werden. Für unterschiedliche Prüfverhältnisse können sich unterschiedliche Größeneffekte ergeben. Das Prüfverhältnis zur Ermittlung der Biegefestigkeit beträgt nach EN 384 und EN 408 $s/h = 18$ mit Krafterleitung in den Drittelpunkten (Abb. 1.1).

In diesem Kapitel wird der Größeneffekt bei Standardbedingungen untersucht. Unter dem Begriff Standardbedingungen wird im Rahmen dieser Arbeit die Ermittlung der Biegefestigkeit

- bei einem Prüfverhältnis von $s/h = 18$,
- bei einer Lage der größten Ästigkeit tKAR und damit des kritischen Querschnitts im mittleren Drittel der Prüflänge (in Längsrichtung „systematisch“),
- bei einer Lage der größten Ästigkeit mKAR auf der Biegezugseite (im Querschnitt „orientiert“)

verstanden. Die von den Prüfbedingungen nach EN 384 abweichende Lage der größten Ästigkeit mKAR auf der Biegezugseite wird verwendet, da hierfür die größte Prüfkörperanzahl zur Verfügung steht.

5.2 Material

Insgesamt stehen 4156 Biegeprüfkörper zur Auswertung zur Verfügung (Abb. 3.4). Abb. 5.2 gibt einen Überblick über die vorhandenen Prüfkörperanzahlen unterteilt in die jeweiligen Prüfbedingungen.

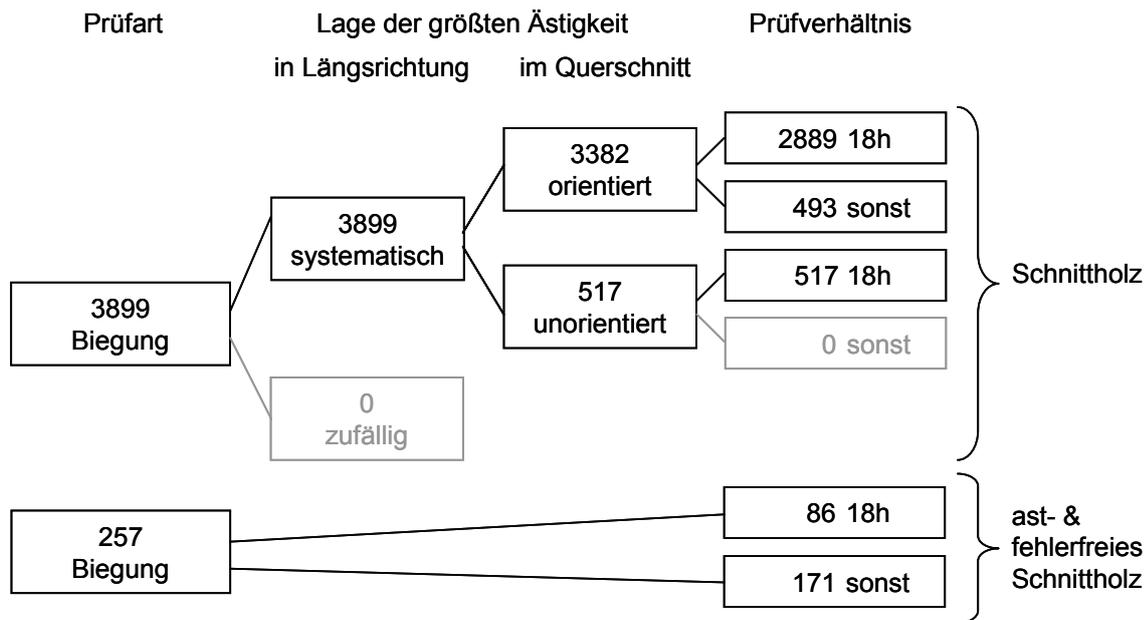


Abb. 5.2: Prüfkörperanzahlen getrennt nach Prüfbedingungen, n = 4156 PK.

Alle 3899 Biegeversuche an Schnittholz wurden entsprechend EN 384 in Bezug auf die Lage der größten Ästigkeit in Längsrichtung normgerecht durchgeführt. Ein Großteil der Biegeprüfungen (3382 PK) wurde mit orientierter Astlage durchgeführt und damit nicht entsprechend EN 384. Zur Untersuchung des Größeneffektes bei Biegung unter Standardbedingungen stehen insgesamt 2889 Prüfkörper zur Verfügung. Darüber hinaus stehen 86 ast- und fehlerfreie Prüfkörper aus der zusätzlich durchgeführten Versuchsreihe zur Verfügung (Kap. 3.2.2). Diese werden für die Herleitung des Größeneffektes bei Standardbedingungen für ast- und fehlerfreies Material verwendet.

Abb. 5.3 zeigt den Einfluss der Querschnittsbreite auf die nach Gl. (3.10) holzfeuchtekorrigierte Biegefestigkeit für 2889 Schnitthölzer, unterteilt in die insgesamt 12 Kollektive. Zusätzlich eingetragen ist der Verlauf des 50%-Quantils für diejenigen Kollektive, bei denen Festigkeitswerte für unterschiedliche Querschnittsbreiten ermittelt wurden. Als Regressionsansatz wurde in Anlehnung an die Literaturdaten eine Potenzfunktion mit dem Erwartungswert $E(f_{m,u=12\%}) = c_0 \cdot h^{h_0}$ gewählt. Auffällig sind die unterschiedlichen Verläufe der Regressionskurven sowohl in Bezug auf das Festigkeitsniveau als auch in Bezug auf die Steigung. Im Mittel nimmt die Biegefestigkeit mit zunehmender Querschnittsbreite zu (Abb. 4.2). Um den Einfluss der Querschnittsbreite auf dem Niveau des 5%-Quantils darstellen zu können, werden pro Kollektiv und Querschnittsgruppe die Prüfkörper absteigend nach Biegefestigkeit geordnet und die 10 % schwächsten Schnitthölzer identifiziert. Kollektive mit weniger als 10 Schnitthölzern bleiben unberücksichtigt. Werden für diese Prüfkörper die Biegefestigkeitswerte bei $u = 12\%$ über der Querschnittsbreite aufgetragen, zeigen die Regressionskurven den Einfluss der Querschnittsbreite auf die Biegefestigkeit auf dem Niveau des 5%-Quantils (Abb. 5.4). Die Biegefestigkeit scheint mit zunehmender Querschnittsbreite auf dem 5%-Quantilniveau ebenfalls zuzunehmen.

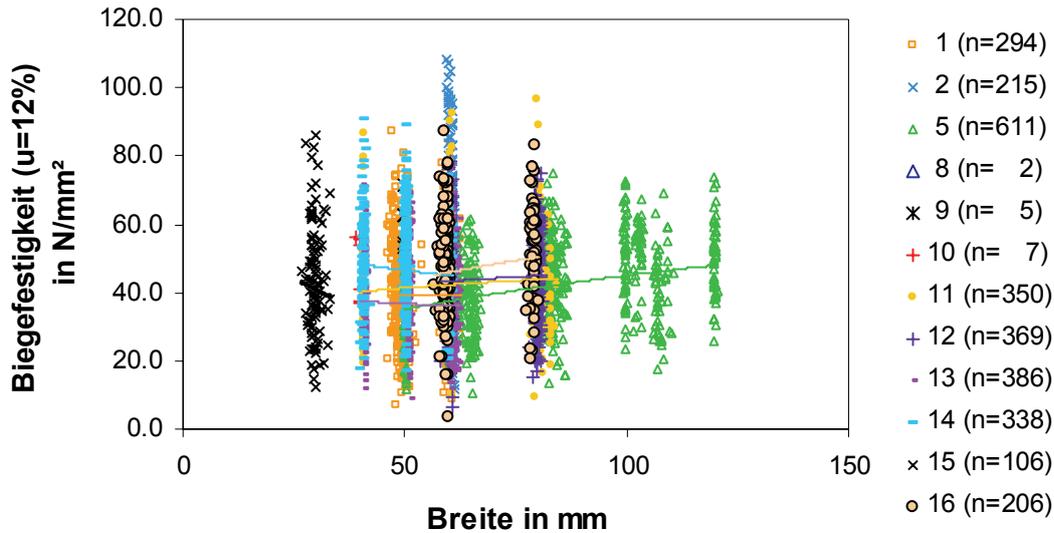


Abb. 5.3: Biegefestigkeit bei $u = 12\%$ über Querschnittsbreite getrennt nach Kollektiv entsprechend Tab. A.6, $n = 2889$ PK.

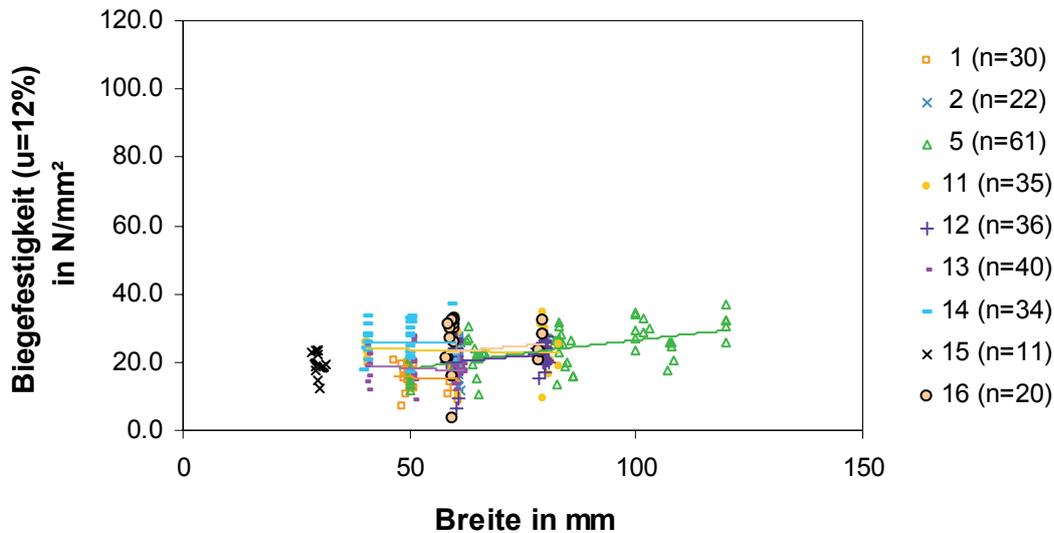


Abb. 5.4: Charakteristische Biegefestigkeit bei $u = 12\%$ über Querschnittsbreite getrennt nach Kollektiv entsprechend Tab. A.6, $n = 289$ PK.

Abb. 5.5 und Abb. 5.6 zeigen den Zusammenhang zwischen nach Gl. (3.10) holzfeuchtekorrigierter Biegefestigkeit und Querschnittshöhe auf dem Niveau der 50%- und der 5%-Quantile. Die Biegefestigkeit scheint auf dem Niveau des 50%-Quantils im Mittel mit zunehmender Höhe überwiegend unverändert zu bleiben, während auf dem Niveau des 5%-Quantils die Biegefestigkeit mit Ausnahme der Prüfkörper des Kollektives 11 mit zunehmender Querschnittshöhe leicht zunimmt. Eine Zunahme der Biegefestigkeit mit

zunehmender Querschnittsabmessung steht allerdings im Widerspruch zu nahezu allen in der Literatur entwickelten Modellen und Ergebnissen.

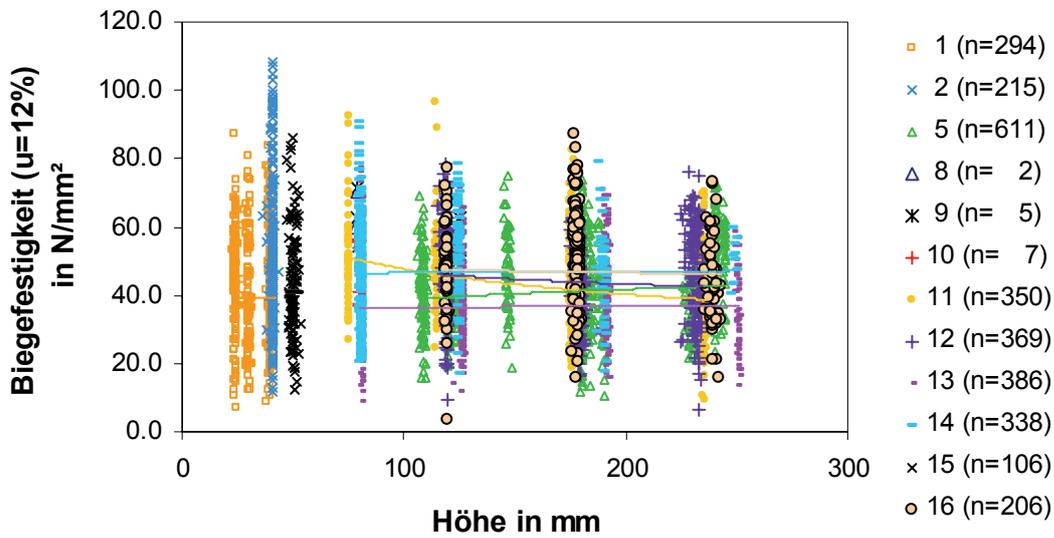


Abb. 5.5: Biegefestigkeit bei $u = 12\%$ über Querschnittshöhe getrennt nach Kollektiv entsprechend Tab. A.6, $n = 2889$ PK.

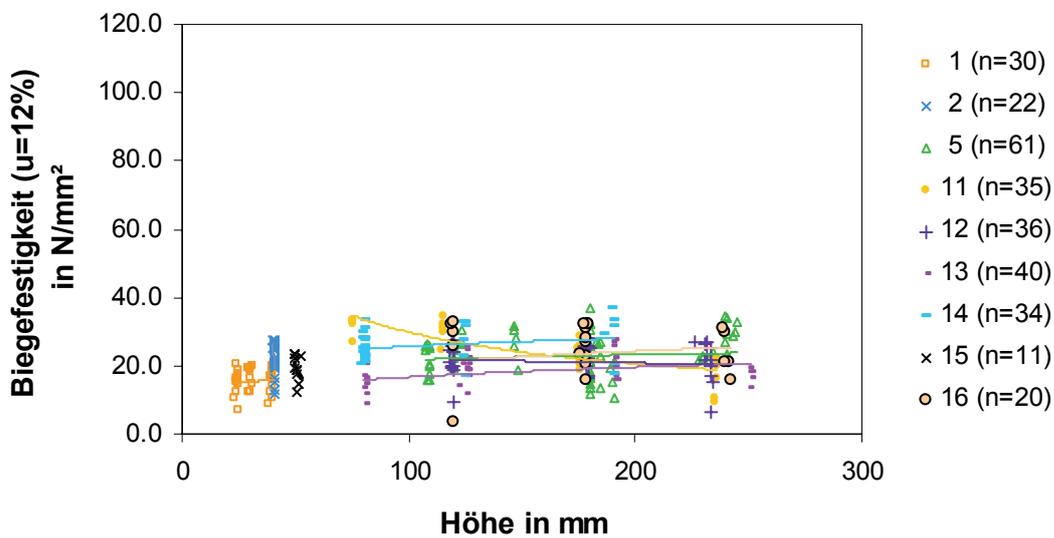


Abb. 5.6: Charakteristische Biegefestigkeit bei $u = 12\%$ über Querschnittshöhe getrennt nach Kollektiv entsprechend Tab. A.6, $n = 289$ PK.

5.3 Modellbildung

5.3.1 Erläuterungen

Ziel der Modellbildung ist es, ein möglichst allgemeingültiges, stabiles und daher einfaches Modell zu schaffen. Aufgrund der in Kap. 4 gewonnenen Erkenntnisse kann Abb. 4.1 modifiziert werden (Abb. 5.7). Die Holzabmessungen können die Biegefestigkeit sowohl „direkt“ als auch „indirekt“ beeinflussen. Der direkte Größeneffekt bezeichnet die Einflüsse von Querschnittsbreite, Querschnittshöhe, Stützweite und Kraftweite auf die Biegefestigkeit losgelöst von den geometrischen Einflüssen auf die Holzeigenschaften. Dieser direkte Größeneffekt kann nur theoretisch berechnet werden. Werden die Holzabmessungen verändert, verändern sich auch die Holzeigenschaften und mit den Holzeigenschaften die Biegefestigkeit. Der sich über die Holzeigenschaften ergebende Einfluss der Holzabmessungen auf die Biegefestigkeit wird unter dem Begriff „indirekter Größeneffekt“ zusammengefasst. Auch der indirekte Größeneffekt kann nur theoretisch berechnet werden. Bei praktischen Biegeversuchen lässt sich der direkte Größeneffekt nicht vom indirekten Größeneffekt trennen. Die Kombination aus direktem und indirektem Größeneffekt wird im Weiteren als „wirksamer Größeneffekt“ bezeichnet. Der wirksame Größeneffekt entspricht dem in der Literatur angegebenen Größeneffekt.

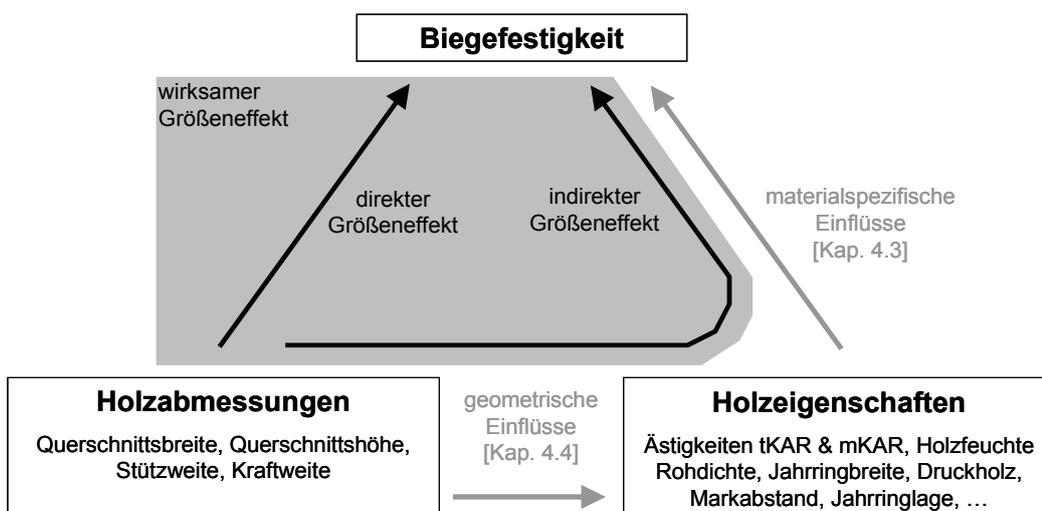


Abb. 5.7: Einteilung des Größeneffektes generell.

Direkter und indirekter Größeneffekt beinhalten die Einflüsse der Querschnittsbreite, der Querschnittshöhe, der Stützweite und der Kraftweite auf die Biegefestigkeit. Im Folgenden werden diese Zusammenhänge mit Hilfe eines Modells zunächst allgemeingültig abgebildet und im Weiteren vereinfacht.

5.3.2 Modellansatz

Ziel ist, den Größeneffekt mit einem Modellansatz allgemeingültig zu beschreiben. Der Modellansatz enthält folglich die Holzabmessungen Querschnittsbreite b , Querschnittshöhe h und Stützweite s . Auf die

Kraftweite k wird im Rahmen der Modellbildung verzichtet, da Stütz- und Kraftweite Vielfache voneinander sind und deshalb ineinander überführt werden können. Darüber hinaus enthält der Modellansatz die Holzeigenschaften Ästigkeit t_{KAR} , Ästigkeit m_{KAR} , Darr-Rohdichte ρ_0 , Jahrringbreite j_{rb} , Druckholzanteil dh , Markabstand m und Jahrringlage j_{rl} . Auf den Einfluss der Holzfeuchte u wird verzichtet, da im Weiteren die auf eine einheitliche Holzfeuchte korrigierte Biegefestigkeit entsprechend Kap. 4.3.2 verwendet wird. Auf den Einfluss sonstiger biologischer Faktoren auf die Biegefestigkeit wird ebenfalls verzichtet, da ihr Anteil sehr gering ist und ihr Vorkommen nicht in Zusammenhang mit den Holzabmessungen steht.

Im Modell sollen direkte und indirekte Einflüsse der Holzabmessungen getrennt werden können und ein Vergleich mit Literaturdaten soll möglich sein. In Anlehnung an die bisher gewonnenen Erkenntnisse wird ein Ansatz der Form

$$E(f_{m,u=12\%}) = \underbrace{f(\rho_0, j_{rb}, t_{KAR}, m_{KAR}, dh, m, j_{rl})}_{\substack{\text{indirekter} \\ \text{Größeneffekt} \\ \text{(in Anlehnung an Kap.4)}}} \cdot \underbrace{\left(\frac{75}{b}\right)^{b_0} \cdot \left(\frac{150}{h}\right)^{h_0} \cdot \left(\frac{2700}{s}\right)^{s_0}}_{\substack{\text{direkter} \\ \text{Größeneffekt} \\ \text{(in Anlehnung an WEIBULL)}}} \quad (5.1)$$

gebildet. Die Faktoren des direkten Größeneffektes werden in Anlehnung an die WEIBULL-Theorie gewählt, da für den direkten Größeneffekt kein eingängigeres Modell zur Verfügung steht und da mit diesem Ansatz der direkte Größeneffekt mit den bisher in der Literatur und in der Normung verankerten Größeneffekten verglichen werden kann. Den in Kap. 2.3.2 diskutierten Schwachstellen der WEIBULL-Theorie wird durch den im Ansatz enthaltenen indirekten Größeneffekt Rechnung getragen. Für den direkten Größeneffekt werden als Bezugsgrößen entsprechend EN 1995-1-1 und EN 384 eine Querschnittshöhe von $h = 150$ mm und eine Länge bzw. Stützweite von $s = 18 \cdot h = 2700$ mm zugrunde gelegt. Die Querschnittsbreite wird mit $b = 75$ mm gewählt. Die einzelnen Gleichungsglieder werden im Weiteren wie folgt bezeichnet:

$$E(f_{m,u=12\%}) = \underbrace{f(\rho_0, j_{rb}, t_{KAR}, m_{KAR}, dh, m, j_{rl})}_{\text{indirekter Größeneffekt}} \cdot \underbrace{\left(\frac{75}{b}\right)^{\overbrace{b_0}^{\text{Breiten-}}}}_{\text{Breitenfaktor } k_b} \cdot \underbrace{\left(\frac{150}{h}\right)^{\overbrace{h_0}^{\text{Höhen-}}}}_{\text{Höhenfaktor } k_h} \cdot \underbrace{\left(\frac{2700}{s}\right)^{\overbrace{s_0}^{\text{Längen-}}}}_{\text{Längenfaktor } k_s} \quad (5.2)$$

direkter Größeneffekt

5.3.3 Auswahlverfahren und Bestimmung der Modellparameter

5.3.3.1 Problemstellung und Lösungsweg

Aufgrund der komplexen Zusammenhänge zwischen den Holzabmessungen, den Holzeigenschaften und der Biegefestigkeit (Kap. 4) müssen aus der Fülle der Holzabmessungen und Holzeigenschaften diejenigen identifiziert werden, die die Biegefestigkeit wesentlich beeinflussen und deren Einflüsse nicht durch andere Holzabmessungen oder andere Holzeigenschaften abgedeckt werden können.

Zur Lösung des Problems bietet sich die Regressionsrechnung an. Da nichtlineare Regressionsansätze bei komplexen Fragestellungen oftmals mathematisch instabil sind, werden zunächst mit Hilfe einer multiplen linearen Regressionsrechnung die wesentlichen Einflussgrößen identifiziert.

Eine Regressionsgleichung wird für eine gegebene Anzahl an Einflussgrößen bei vorgegebener Irrtumswahrscheinlichkeit als beste Regressionsgleichung bezeichnet, wenn sie

- nur signifikante Glieder enthält und
- einen möglichst großen Anteil der Varianz der Zielgröße erklären kann, d.h. die Quadratsumme der Abweichung zwischen dem Erwartungswert der Regressionsgleichung und der Zielgröße minimiert.

Diese Anforderungen führen zu einer Optimierungsaufgabe, die mit Hilfe einer schrittweisen Regressionsrechnung gelöst wird. Abb. 5.8 zeigt schematisch den Ablauf der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten, schrittweisen Regressionsrechnung. Über eine einfache Korrelationsrechnung wird in einem ersten Schritt diejenige Einflussgröße bestimmt, deren Regressionskoeffizient signifikant von Null verschieden ist und die die Quadratsumme der Abweichungen zwischen den berechneten und den beobachteten Werten minimiert. Die Koeffizienten der Regressionsgleichung mit dieser Einflussgröße werden bestimmt und die Erwartungswerte der Gleichung sowie die Residuen zur Zielgröße berechnet. Im zweiten Schritt wird aus der Menge der noch nicht in der Regressionsgleichung befindlichen Einflussgrößen diejenige ausgewählt, deren Regressionskoeffizient signifikant von Null verschieden ist und die von allen nicht in der Regression befindlichen Größen die Quadratsumme der Abweichungen zwischen dem Erwartungswert der Regressionsgleichung und der Zielgröße am stärksten reduziert. Nach Aufnahme der Einflussgröße wird mit Hilfe eines F-Tests geprüft, ob die Aufnahme der Einflussgröße zu einer signifikanten Verringerung der nicht erklärten Varianz der Zielgröße beiträgt. Dazu wird im Rahmen dieser Arbeit eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha \leq 0.05$ angesetzt. Im Laufe der Regressionsrechnung kann der Fall eintreten, dass eine bereits in der Regressionsgleichung enthaltene Einflussgröße ihre Signifikanz verliert, da eine später aufgenommene Einflussgröße eng mit einer bereits enthaltenen Einflussgröße korreliert. Deshalb wird nach jedem Aufnahmeschritt mit Hilfe eines partiellen F-Tests die Hypothese geprüft, ob eine bereits in die Regressionsgleichung aufgenommene Einflussgröße auch nach Hinzunahme einer neuen Einflussgröße einen Beitrag zur Verringerung der nicht erklärten Varianz der

Zielgröße liefert (Irrtumswahrscheinlichkeit $\beta \leq 0.10$). Erweist sich dabei eine Einflussgröße als nicht signifikant, wird sie aus der Regressionsgleichung entfernt und den nicht in der Gleichung enthaltenen Einflussgrößen zugeordnet. Die schrittweise Regression bricht ab, wenn die „beste“ Regressionsgleichung vorliegt, d.h. wenn die Koeffizienten aller in die Regression einbezogenen Einflussgrößen signifikant sind und der vorliegende Regressionsansatz keine weiteren Einflussgrößen enthält, die eine signifikante Minderung der Quadratsumme der Residuen bewirken. Durch die große Anzahl an Prüfkörpern werden voraussichtlich sehr viele zur Verfügung stehende Einflussgrößen als signifikant in die schrittweise Regressionsanalyse aufgenommen, bringen aber mehr oder weniger Erklärungskraft in Bezug auf die Biegefestigkeit mit sich.

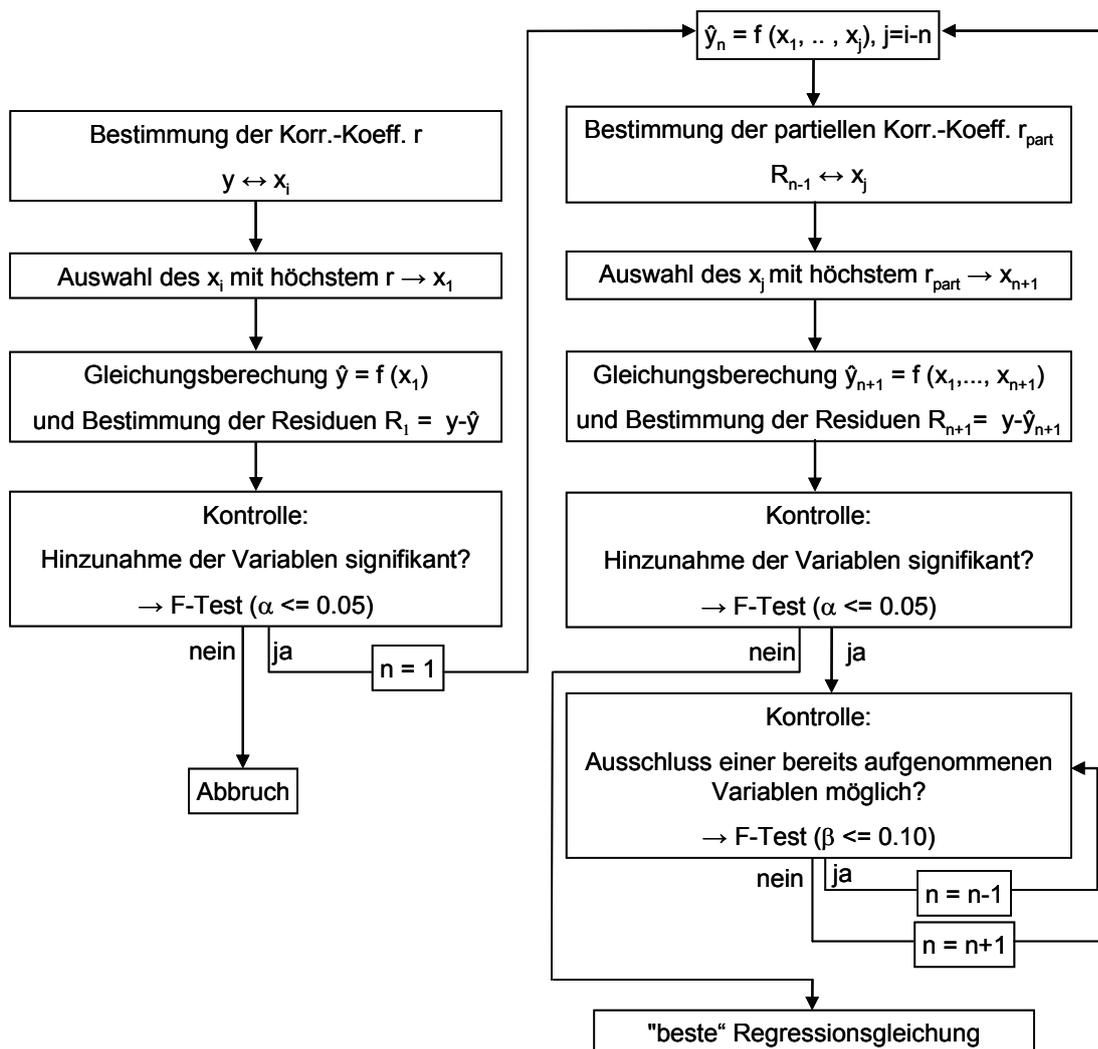


Abb. 5.8: Ablauf der schrittweisen Regressionsrechnung mit definierten Irrtumswahrscheinlichkeiten (y ... Zielgröße, x_i ... Einflussgrößen, n ... Anzahl an Regressionsgliedern und -koeffizienten, α ... Irrtumswahrscheinlichkeit 1. Ordnung, β ... Irrtumswahrscheinlichkeit 2. Ordnung).

Um eine schrittweise Regressionsrechnung durchführen zu können, muss zunächst ein geeigneter Regressionsansatz entwickelt werden, anhand dessen die Regressionsrechnung durchgeführt wird. Der

Regressionsansatz muss mit Bedacht gewählt werden, da der Ansatz das Ergebnis maßgeblich beeinflussen kann. Ist der Einfluss einer Größe x_i auf die Zielgröße nicht unabhängig von anderen Einflussgrößen x_j , sondern die unterschiedlichen Einflussgrößen x_i beeinflussen sich in ihrer Wirkung auf die Zielgröße gegenseitig, müssen Wechselwirkungen im Regressionsansatz berücksichtigt werden. Sind zwei Einflussgrößen x_1 und x_2 im Regressionsansatz zur Beschreibung der Zielgröße Biegefestigkeit zu berücksichtigen, lautet der Ansatz in allgemeiner Form (Gl. (5.3)):

$$E(f_m) = f_1(x_1) \cdot f_2(x_2) \quad (5.3)$$

Besteht zwischen der Zielgröße und den Einflussgrößen ein linearer Zusammenhang, kann für die Funktionen $f_i(x_i)$ eine Gleichung der Form $f_i(x_i) = c_{0,i} + c_{1,i} \cdot x_i$ gewählt werden. Können Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen x_1 und x_2 nicht ausgeschlossen werden, müssen gemischte Glieder in den Regressionsansatz eingeführt werden (Gl. (5.4)):

$$E(f_m) = c_0 + c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + c_3 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (5.4)$$

Besteht zwischen der Zielgröße Biegefestigkeit und den Einflussgrößen ein nichtlinearer Zusammenhang, kann für die Funktionen $f_i(x_i)$ eine Gleichung q -ter Ordnung der Form $f_i(x_i) = c_{0,i} + c_{1,i} \cdot x_i + c_{2,i} \cdot x_i^2 + c_{3,i} \cdot x_i^3 + \dots + c_{q,i} \cdot x_i^q$ gewählt werden. Da Glieder vierter und höherer Ordnung erfahrungsgemäß zu keinem wesentlich besseren Ergebnis führen, werden im Fall des nichtlinearen Zusammenhangs die Funktionen $f_i(x_i)$ auf einen Ansatz dritter Ordnung $f_i(x_i) = c_{0,i} + c_{1,i} \cdot x_i + c_{2,i} \cdot x_i^2 + c_{3,i} \cdot x_i^3$ beschränkt (Gl. (5.5)):

$$\begin{aligned} E(f_m) = & c_0 + c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_1^2 + c_3 \cdot x_1^3 \\ & + c_4 \cdot x_2 + c_5 \cdot x_2^2 + c_6 \cdot x_2^3 \\ & + c_7 \cdot x_1 \cdot x_2 + c_8 \cdot x_1^2 \cdot x_2 + c_9 \cdot x_1 \cdot x_2^2 \end{aligned} \quad (5.5)$$

5.3.3.2 Auswahl der Parameter des Modellansatzes

Aufgrund der in Kap. 4.2 bis Kap. 4.5 dargestellten Zusammenhänge wird nachfolgend festgelegt, welche Einflussgrößen linear und welche Einflussgrößen nichtlinear im Regressionsansatz zur Beschreibung der Biegefestigkeit berücksichtigt werden:

- Da in diesem Kapitel ein Modell des Größeneffektes bei Standardbedingungen hergeleitet wird, kann entweder auf den Einfluss der Stützweite oder den Einfluss der Querschnittshöhe verzichtet werden, weil das Prüfverhältnis bei Standardbedingungen mit $s/h = 18$ definiert ist. Im Weiteren wird auf die Stützweite verzichtet und die Querschnittshöhe als Einflussgröße gewählt.
- Da der Größeneffekt untersucht werden soll und unklar ist, welchen Gesetzmäßigkeiten der Größeneffekt unterliegt, werden die Querschnittsbreite und die Querschnittshöhe im Regressionsansatz als nichtlineare Einflussgrößen berücksichtigt.

- Die Ästigkeiten tKAR und mKAR werden aufgrund der Zusammenhänge in Abb. 4.5 und Abb. 4.6 als nichtlineare Einflussgrößen im Regressionsansatz erfasst.
- Die Holzfeuchte wird nicht mehr in den Regressionsansatz aufgenommen, weil die Biegefestigkeit mit Hilfe von Gl. (3.10) bereits auf eine konstante Holzfeuchte von $u = 12\%$ umgerechnet wurde (Kap. 4.3.2).
- Die Darr-Rohdichte wird aufgrund der Zusammenhänge in Abb. 4.8 als lineare Einflussgröße im Regressionsansatz berücksichtigt.
- Die Jahrringbreite wird aufgrund der Zusammenhänge in Abb. 4.9 als nichtlineare Einflussgröße im Regressionsansatz berücksichtigt. Durch den nichtlinearen Ansatz der Jahrringbreite wird dem nichtlinearen Zusammenhang zwischen Darr-Rohdichte und Jahrringbreite Rechnung getragen (Abb. 4.17).
- Der Druckholzanteil und der Markabstand werden linear angesetzt, da aufgrund der großen Streuungen der Variablen keine Tendenzen zu einem nichtlinearen Ansatz erkennbar sind (Abb. 4.10 und Abb. 4.11).
- Die Jahrringlage kann nicht als nominale Variable in die Regressionsanalyse aufgenommen werden. Um festzustellen, ob die Jahrringlage einen signifikanten Einfluss auf die Biegefestigkeit besitzt, wird die nominale Variable in eine ordinal skalierte Variable gewandelt und so in die Regressionsrechnung eingebunden. Zum Bilden der Rangordnung innerhalb der ordinalen Variablen werden die Jahrringlagen entsprechend Tab. 5.2 transformiert. Die in Tab. 5.2 dargestellte Zuordnung ist prüfartabhängig, weil die Jahrringlage bei markhaltigen Prüfkörpern je nach Prüfmart unterschiedlich ist. Da Prüfkörper mit im Zugbereich stehenden Jahrringen hohe Biegefestigkeiten und Prüfkörper mit im Zugbereich liegenden Jahrringen geringere Biegefestigkeiten aufweisen (Tab. 4.3), werden stehende Jahrringlagen in der ordinalen Variablen dem höchsten Rang und liegende Jahrringlagen dem geringsten Rang zugeordnet. Die Jahrringlage wird als lineare Einflussgröße im Regressionsansatz berücksichtigt.

Tab. 5.2: Ordinale Codierung der Jahrringlage entsprechend der Prüfmart.

Prüfmart	Rang	liegend	45 Grad	stehend	Mark mittig	Mark Zug	Mark Druck
BH	1	X			X		X
	2		X				
	3			X		X	
BF	1	X			X		
	2		X				
	3			X		X	X

Gl (5.6) zeigt den gewählten, vollständigen Regressionsansatz mit allen linearen und nichtlinearen Einflussgrößen sowie deren möglichen Kombinationen. In Gl. (5.6) sind alle möglichen Einflussgrößenkombinationen bis zur dritten Ordnung berücksichtigt, da aufgrund der bisherigen Untersuchungen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Einflussgrößen nicht definitiv ausgeschlossen werden können.

$$\begin{aligned}
 E(f_m) = & c_0 \\
 & +b \cdot (c_1 + c_2 \cdot h + c_3 \cdot tKAR + c_4 \cdot mKAR + c_5 \cdot \rho_0 + c_6 \cdot jrb \\
 & \quad + c_7 \cdot dh + c_8 \cdot m + c_9 \cdot jrl) \\
 & +b^2 \cdot (c_{10} + c_{11} \cdot h + c_{12} \cdot tKAR + c_{13} \cdot mKAR + c_{14} \cdot \rho_0 + c_{15} \cdot jrb \\
 & \quad + c_{16} \cdot dh + c_{17} \cdot m + c_{18} \cdot jrl) \\
 & +b^3 \cdot c_{19} \\
 & +h \cdot (c_{20} + c_{21} \cdot tKAR + c_{22} \cdot mKAR + c_{23} \cdot \rho_0 + c_{24} \cdot jrb \\
 & \quad + c_{25} \cdot dh + c_{26} \cdot m + c_{27} \cdot jrl) \\
 & +h^2 \cdot (c_{28} + c_{29} \cdot b + c_{30} \cdot tKAR + c_{31} \cdot mKAR + c_{32} \cdot \rho_0 + c_{33} \cdot jrb \\
 & \quad + c_{34} \cdot dh + c_{35} \cdot m + c_{36} \cdot jrl) \\
 & +h^3 \cdot c_{37} \\
 & +tKAR \cdot (c_{38} + c_{39} \cdot mKAR + c_{40} \cdot \rho_0 + c_{41} \cdot jrb + c_{42} \cdot dh + c_{43} \cdot m + c_{44} \cdot jrl) \\
 & +tKAR^2 \cdot (c_{45} + c_{46} \cdot b + c_{47} \cdot h + c_{48} \cdot mKAR + c_{49} \cdot \rho_0 + c_{50} \cdot jrb \\
 & \quad + c_{51} \cdot dh + c_{52} \cdot m + c_{53} \cdot jrl) \\
 & +tKAR^3 \cdot c_{54} \\
 & +mKAR \cdot (c_{55} + c_{56} \cdot \rho_0 + c_{57} \cdot jrb + c_{58} \cdot dh + c_{59} \cdot m + c_{60} \cdot jrl) \\
 & +mKAR^2 \cdot (c_{61} + c_{62} \cdot b + c_{63} \cdot h + c_{64} \cdot tKAR + c_{65} \cdot \rho_0 + c_{66} \cdot jrb \\
 & \quad + c_{67} \cdot dh + c_{68} \cdot m + c_{69} \cdot jrl) \\
 & +mKAR^3 \cdot c_{70} \\
 & +\rho_0 \cdot (c_{71} + c_{72} \cdot jrb + c_{73} \cdot dh + c_{74} \cdot m + c_{75} \cdot jrl) \\
 & +jrb \cdot (c_{76} + c_{77} \cdot dh + c_{78} \cdot m + c_{79} \cdot jrl) \\
 & +jrb^2 \cdot (c_{80} + c_{81} \cdot b + c_{82} \cdot h + c_{83} \cdot tKAR + c_{84} \cdot mKAR + c_{85} \cdot \rho_0 \\
 & \quad + c_{86} \cdot dh + c_{87} \cdot m + c_{88} \cdot jrl) \\
 & +jrb^3 \cdot c_{89} \\
 & +dh \cdot (c_{90} + c_{91} \cdot m + c_{92} \cdot jrl) \\
 & +m \cdot (c_{93} + c_{94} \cdot jrl) \\
 & +jrl \cdot c_{95}
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

Grundlage der Regressionsrechnung sind die 2889 biegegeprüften Fichtenschnitthölzer (Abb. 5.2), da der Größeneffekt bei Standardbedingungen gelöst werden soll und diese Prüfkörper entsprechend geprüft wurden. Voruntersuchungen zeigten, dass der Gesamtansatz wegen der großen Datenmenge und der damit verbundenen sehr niedrigen Signifikanzschwelle nicht immer zum bestmöglichen Ergebnis führt. Deshalb wird die schrittweise Regressionsrechnung in mehreren Schritten durchgeführt: In einem ersten Schritt wird für jede Einflussgröße einzeln, entsprechend ihrem gewählten Ansatz, die Korrelation mit der ermittelten, holzfeuchtekorrigierten Biegefestigkeit über eine schrittweise Regression berechnet. Als Einflussgröße mit der größten Varianzminderung der Biegefestigkeit ergibt sich dabei die Ästigkeit mKAR. Im nächsten Schritt wird für jede der verbleibenden acht Einflussgrößen jeweils wieder eine schrittweise Regressionsrechnung durchgeführt und zwar mit einem Regressionsansatz, der die Ästigkeit

mKAR mit allen Gliedern der jeweiligen zweiten Einflussgröße kombiniert. Wird die Ästigkeit mKAR mit einer Einflussgröße, die linear in den Regressionsansatz eingehen soll, kombiniert, umfasst der Regressionsansatz sieben Glieder. Wird die Ästigkeit mKAR mit einer Einflussgröße, die nichtlinear in den Regressionsansatz eingehen soll, kombiniert, umfasst der Regressionsansatz zehn Glieder. Danach wird wiederum derjenige Regressionsansatz weiterverfolgt, der zur größten Varianzminderung der Residuen aus dem Erwartungswert der Biegefestigkeit und der im Versuch ermittelten Biegefestigkeit führt. Auf diese Art und Weise wird Schritt für Schritt festgelegt, welche Einflussgrößen in die Regressionsgleichung eingehen.

Tab. 5.3 und Abb. 5.9 fassen die Ergebnisse dieser Regressionsanalysen anhand der 2889 Prüfkörper zusammen. Die beste Korrelation zwischen dem aufgrund der jeweiligen Regressionsgleichung berechneten Erwartungswert der Biegefestigkeit und der im Versuch ermittelten Biegefestigkeit bei $u = 12\%$ beträgt $r = 0.82$. Der Korrelationskoeffizient r wird aus dem adjustierten Bestimmtheitsmaß r^2 errechnet, welches berücksichtigt, dass das Bestimmtheitsmaß r^2 mit der Anzahl an unabhängigen Variablen steigt (SACHS & HEDDERICH 2006). Maximal 68 % der Streuung der Biegefestigkeit können mit den aufgenommenen Einflussgrößen erklärt werden, 32 % der Streuung der Biegefestigkeit werden durch die berücksichtigten Einflussgrößen nicht abgedeckt. Die Korrelation von $r = 0.82$ wird bereits mit fünf Einflussgrößen erreicht. Die Parameter Druckholz, Jahrringlage, Markabstand und Breite werden zwar als signifikante Einflussgrößen in die Regressionsgleichung aufgenommen, verringern die Quadratsumme der Residuen aber nicht weiter.

Tab. 5.3: Multiple Regressionsanalyse der Biegefestigkeit, $n = 2889$ PK.

Anzahl der berücksichtigten Parameter	-	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
zusätzliche aufgenommener Parameter	-	- mKAR	ρ_0	jrb	h	tKAR	dh	m	jrl	b	
Korrelationskoeffizient r	-	0.00	0.65	0.77	0.79	0.81	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82
Standardabweichung s_r des Residuums	N/mm ²	15.3	11.7	9.6	9.4	9.1	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7
Anteil der Standardabweichung s_r an der Gesamtstandardabweichung s_{ges}	-	1.00	0.76	0.63	0.61	0.59	0.57	0.57	0.57	0.56	0.56
Anzahl der signifikanten Glieder	-	0	2	4	5	6	12	11	13	14	14

Anmerkung: Abkürzungen siehe Abkürzungsverzeichnis S. xvii - xviii

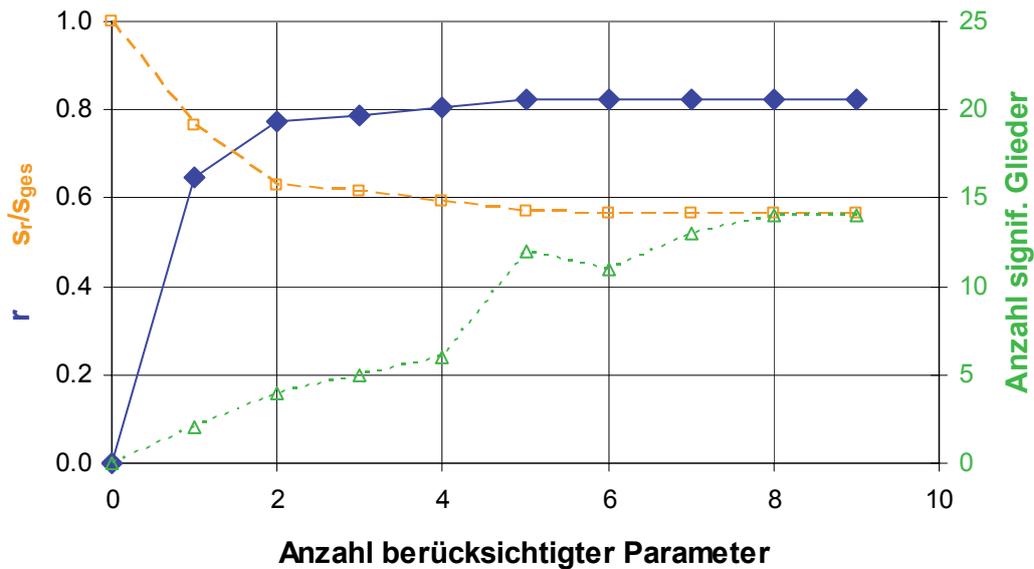


Abb. 5.9: Multiple Regressionsanalyse der Biegefestigkeit, $n = 2889$ PK.

Die Querschnittsbreite wird als letzter Parameter in der Regressionsgleichung erfasst, was bedeutet, dass sie für die Biegefestigkeit nicht entscheidend ist. Abb. 5.5 und Abb. 5.6 zeigen aber, dass die Biegefestigkeit tendenziell mit zunehmender Breite zunimmt. Dieser Einfluss ist somit über die Wechselwirkung der Querschnittsbreite mit den Holzeigenschaften bereits in der Regressionsgleichung berücksichtigt. Der indirekte Breitenefekt bewirkt, dass die Querschnittsbreite darüber hinaus offenbar nur einen sehr geringen Einfluss auf die Biegefestigkeit besitzt und deshalb als letzte Einflussgröße in die Regressionsgleichung aufgenommen wird.

Da die Regressionsgleichung für das zu erstellende Modell nur die Einflussgrößen beinhalten soll, die einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Regressionsgleichung leisten, und sich die Korrelation zwischen dem Erwartungswert der Biegefestigkeit und der im Versuch bestimmten Biegefestigkeit nach der Aufnahme der Einflussgröße t_{KAR} in die Regressionsgleichung nicht mehr wesentlich verbessert, werden als wesentliche Einflussgrößen die Darr-Rohdichte, die Jahrringbreite, die Ästigkeiten t_{KAR} und m_{KAR} sowie die Querschnittshöhe gewählt. Aufgrund dieser Erkenntnisse kann Abb. 5.7 modifiziert werden (Abb. 5.10): Die Querschnittsbreite besitzt keinen zusätzlichen, signifikanten Einfluss auf die Biegefestigkeit, der nicht über andere Parameter abgedeckt wäre. Auf den Druckholzanteil, den Markabstand und die Jahrringlage kann im Rahmen der Modellierung ebenfalls verzichtet werden.

Bei einer Prüfung unter Standardbedingungen kann nicht zwischen dem direkten Einfluss der Querschnittshöhe und dem direkten Einfluss der Stützweite unterschieden werden, da beide Größen Vielfache voneinander sind. Deshalb wird für Standardbedingungen zunächst ein zusammenfassender Größeneffekt g_0 für beide Einflüsse angenommen, der auf die Querschnittshöhe bezogen wird. Damit kann Gl. (5.2) wie folgt vereinfacht werden (Gl. (5.7)):

$$\begin{aligned}
 E(f_{m,u=12\%}) &= \underbrace{f(\rho_0, jrb, tKAR, mKAR)}_{\substack{\text{indirekter} \\ \text{Größeneffekt} \\ \text{(in Anlehnung an Kap.4)}}} \cdot \underbrace{\left(\frac{150}{h}\right)^{h_0} \cdot \left(\frac{2700}{s}\right)^{s_0}}_{\substack{\text{direkter} \\ \text{Größeneffekt} \\ \text{(in Anlehnung an WEIBULL)}}} \\
 &= f(\rho_0, jrb, tKAR, mKAR) \cdot \left(\frac{150}{h}\right)^{h_0} \cdot \left(\frac{18 \cdot 150}{18 \cdot h}\right)^{s_0} \\
 &= f(\rho_0, jrb, tKAR, mKAR) \cdot \left(\frac{150}{h}\right)^{h_0+s_0} \\
 &= f(\rho_0, jrb, tKAR, mKAR) \cdot \left(\frac{150}{h}\right)^{90}
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

Die mögliche Aufteilung des Größeneffektes in einen Einfluss der Stützweite und einen Einfluss der Querschnittshöhe wird in Kap. 6.2 untersucht. Abb. 5.10 fasst den Größeneffekt bei Standardbedingungen zusammen. Die Querschnittshöhe beeinflusst die Biegefestigkeit sowohl direkt als auch indirekt. Die Querschnittsbreite beeinflusst die Biegefestigkeit nur indirekt über die geometrischen und material-spezifischen Einflüsse.

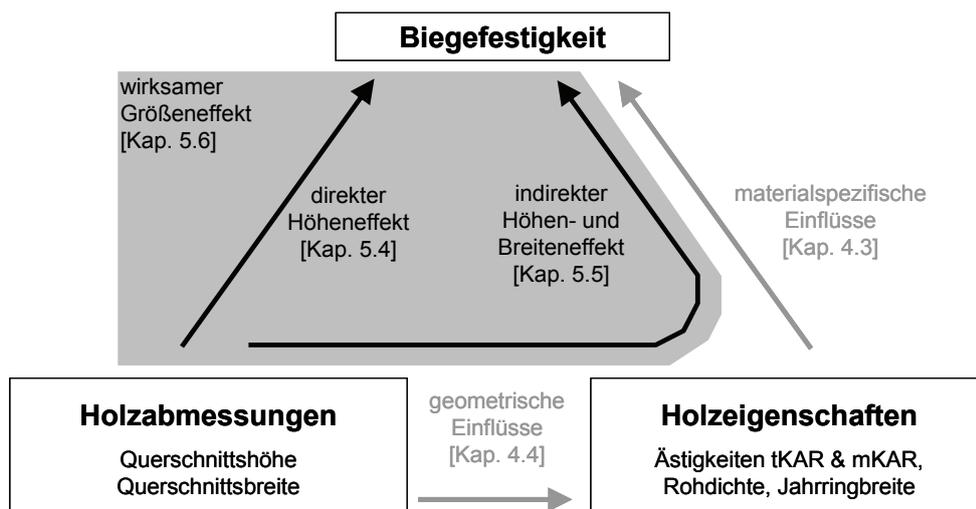


Abb. 5.10: Einteilung des Größeneffektes bei Standardbedingungen.

Um zu prüfen, ob beim indirekten Größeneffekt die Einflüsse der Holzeigenschaften auf die Biegefestigkeit linear oder nichtlinear angesetzt werden müssen, werden zusätzliche schrittweise Regressionsrechnungen nach dem in Abb. 5.8 beschriebenen Ablaufdiagramm durchgeführt. Dazu wird geprüft, ob gemischte Glieder oder Glieder höherer Ordnung im Rahmen des indirekten Größeneffektes zu einer besser geeigneten Beschreibung der Biegefestigkeit führen als ein einfacher linearer Ansatz. Die Daten werden in fünf Kategorien mit unterschiedlicher Querschnittshöhe eingeteilt (Tab. 3.1) und die Regressionsansätze der Form $E(f_{m,u=12\%}) = f(\rho_0, jrb, tKAR, mKAR)$ für jede Kategorie einzeln gelöst. Auf diese Art und Weise kann auf die Querschnittshöhe verzichtet werden, da innerhalb der Kategorien die Querschnittshöhe als konstant angenommen werden kann. Tab. 5.4 zeigt das Ergebnis dreier unterschiedlicher Regressionsrechnungen, wobei die Regressionsglieder in der Reihenfolge ihrer

Aufnahme in das Modell dargestellt sind: Bei der „linearen“ Regression werden die vier Einflussgrößen ohne Kombinationen im Modellansatz berücksichtigt. Bei der „linearen Regression mit gemischten Gliedern“ werden zusätzlich alle einfachen Kombinationen der vier Einflussgrößen berücksichtigt. Bei der „linearen Regression mit quadratischen und kubischen Gliedern“ werden zusätzlich alle Glieder bis zur dritten Ordnung und deren Kombinationen berücksichtigt. Tab. 5.4 zeigt die Ergebnisse der jeweils drei Regressionsrechnungen für die fünf Kategorien sowie deren über die adjustierten Bestimmtheitsmaße berechneten Korrelationskoeffizienten.

Tab. 5.4: Wahl des Ansatzes zur Beschreibung des indirekten Größeneffektes, n = 2889 PK.

Kategorie in mm	h<=60	60<h<=100	100<h<=160	160<h<=200	200<h
n	615	361	667	787	459
linear	mKAR	mKAR	mKAR	mKAR	tKAR
	ρ_0	ρ_0	ρ_0	ρ_0	ρ_0
	tKAR	jrb	jrb	jrb	mKAR
	jrb	tKAR	tKAR	tKAR	jrb
r (adjustiert)	0.89	0.84	0.76	0.77	0.71
linear & gemischte Glieder	ρ_0 $\rho_0 \cdot \text{tKAR}$ $\rho_0 \cdot \text{mKAR}$ $\rho_0 \cdot \text{jrb}$ tKAR · mKAR jrb tKAR	ρ_0 $\rho_0 \cdot \text{mKAR}$ $\rho_0 \cdot \text{jrb}$ $\rho_0 \cdot \text{tKAR}$	ρ_0 $\rho_0 \cdot \text{mKAR}$ $\rho_0 \cdot \text{jrb}$ $\rho_0 \cdot \text{tKAR}$	jrb · mKAR ρ_0 $\rho_0 \cdot \text{mKAR}$ jrb tKAR · mKAR	jrb · tKAR mKAR ρ_0 $\rho_0 \cdot \text{mKAR}$
r (adjustiert)	0.91	0.84	0.77	0.78	0.71
linear & quadratische & kubische Glieder	ρ_0^3 jrb · ρ_0^2 mKAR · ρ_0^2 $\rho_0 \cdot \text{tKAR}^2$ jrb · tKAR ² mKAR ³	tKAR · ρ_0^2 jrb · ρ_0^2 mKAR ρ_0 $\rho_0 \cdot \text{jrb}$ jrb	mKAR · ρ_0^2 ρ_0 jrb · ρ_0^2 $\rho_0 \cdot \text{tKAR}^2$	jrb ² tKAR ² ρ_0^2 $\rho_0 \cdot \text{mKAR}^2$ tKAR · mKAR ² jrb ² jrb · mKAR ² ρ_0^3	jrb · tKAR ρ_0^3 mKAR · ρ_0^2
r (adjustiert)	0.91	0.85	0.77	0.78	0.71

Anmerkung: Abkürzungen siehe Abkürzungsverzeichnis S. xvii - xviii

Die Korrelationskoeffizienten verbessern sich durch die Hinzunahme von gemischten Gliedern oder Gliedern höherer Ordnung, wenn überhaupt, nur unwesentlich. Je komplexer der Ansatz wird, desto stärker unterscheiden sich die in die Regressionsgleichung aufgenommenen Glieder der fünf Kollektive. Die physikalisch nicht gerechtfertigte Aufnahme der Glieder ρ_0^2 und ρ_0^3 zeigt die Problematik komplexer Regressionsgleichungen bereits bei einem linearen Modellansatz. Beim Ansatz ohne gemischte Glieder werden jeweils alle vier Einflussgrößen in die schrittweise Regressionsrechnung aufgenommen.

Interessant ist, dass die Korrelationskoeffizienten mit zunehmender Höhenkategorie bei allen drei Regressionsvarianten abnehmen, obwohl die Streuung der Biegefestigkeit mit zunehmendem Querschnitt ebenfalls abnimmt (Abb. 4.24). Abb. 5.11 liefert die Erklärung: Mit zunehmender Querschnittshöhe wird die Korrelation der Ästigkeiten tKAR und mKAR mit der Biegefestigkeit kleiner. Bei der Korrelation der Darr-Rohdichte und der Jahrringbreite mit der Biegefestigkeit ist kein einheitlicher Trend erkennbar. Da die Ästigkeiten den stärksten Zusammenhang mit der Biegefestigkeit aufweisen (Kap. 4.3), nimmt mit zunehmender Querschnittshöhe die Korrelation der Regressionsgleichungen ab, weil die anderen Einflussgrößen den Korrelationsverlust der Ästigkeiten nicht aufheben können. Mit zunehmender Querschnittsabmessung verlieren die Äste ihren Einfluss auf die Biegefestigkeit, wodurch die Streuung der Biegefestigkeit abnimmt. Dadurch sinkt die Korrelation zwischen Biegefestigkeit und Ästigkeit.

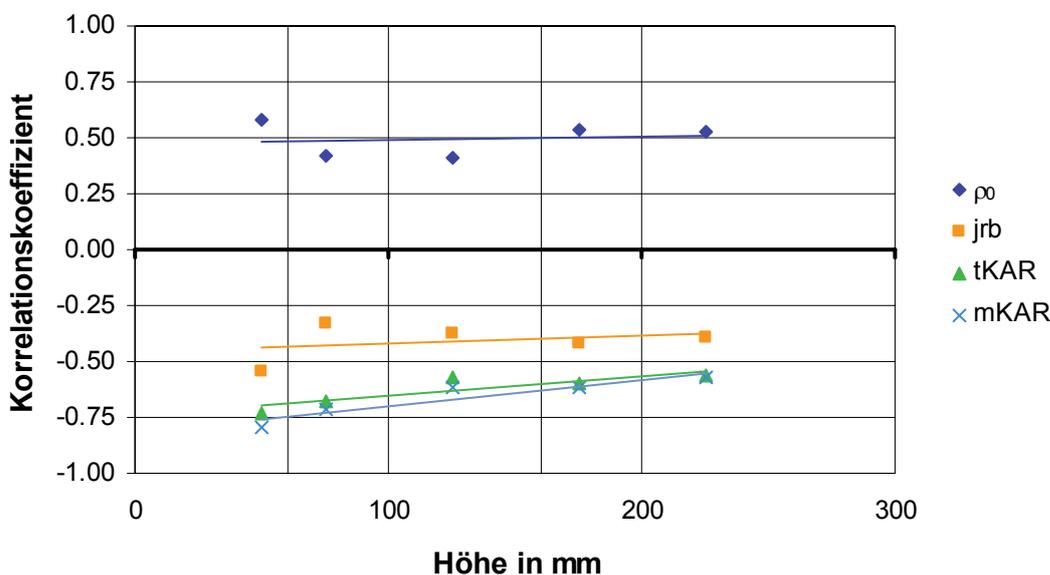


Abb. 5.11: Korrelationskoeffizienten r_{SP} unterschiedlicher Holzeigenschaften mit der Biegefestigkeit bei $u = 12\%$ getrennt nach Höhenkategorie, $n = 2889$ PK.

Da der einfache lineare Ansatz aufgrund dieser Auswertungen keine entscheidenden Nachteile aufweist, erscheint ein Ansatz entsprechend Gl. (5.8) gerechtfertigt:

$$E(f_{m,u=12\%}) = (c_0 + c_1 \cdot \rho_0 + c_2 \cdot jrb + c_3 \cdot tKAR + c_4 \cdot mKAR) \cdot \left(\frac{150}{h}\right)^{g_0} \quad (5.8)$$

Zusätzlich soll untersucht werden, ob sich der Exponent in Abhängigkeit des Festigkeitsniveaus verändert und ob ein Ansatz z.B. der Art

$$E(f_{m,u=12\%}) = (c_0 + c_1 \cdot \rho_0 + c_2 \cdot jrb + c_3 \cdot tKAR + c_4 \cdot mKAR) \cdot \left(\frac{150}{h}\right)^{g_0 + g_1 \cdot tkar} \quad (5.9)$$

besser geeignet wäre, um die Biegefestigkeit zu beschreiben. Dies wird in Kap. 5.6 untersucht.

5.3.4 Bestimmung der Koeffizienten des Modellansatzes

5.3.4.1 Koeffizienten für ast- und fehlerfreie Prüfkörper

Zur Bestimmung der Koeffizienten von Gl. (5.8) für ast- und fehlerfreie Prüfkörper bei Standardprüfbedingungen stehen 86 Schnitthölzer zur Verfügung (Abb. 5.2). Um die Prüfkörperbasis zu erweitern, werden alle Prüfkörper mit einer Ästigkeit $t_{\text{KAR}} \leq 0.05$, die bei Standardbedingungen geprüft wurden, mit in die Auswertung einbezogen. Damit sind zusätzlich 218 nahezu fehlerfreie Prüfkörper aus der Grundgesamtheit der 2889 Prüfkörper verfügbar. Insgesamt können somit 304 Prüfkörper ausgewertet werden. Aufgrund der besonderen Auswahl können die Ästigkeiten t_{KAR} und m_{KAR} in Gl. (5.8) zu Null gesetzt und Gl. (5.8) entsprechend vereinfacht werden (Gl. (5.10)):

$$E(f_{m,u=12\%}) = (c_0 + c_1 \cdot \rho_0 + c_2 \cdot jrb) \cdot \left(\frac{150}{h}\right)^{90} \quad (5.10)$$

Mit dem Ansatz nach Gl. (5.10) wird eine nichtlineare Regressionsrechnung durchgeführt. Der Algorithmus minimiert die Quadratsumme der Residuen von Erwartungswert und Zielgröße, um die „beste“ Regressionsgleichung zu erzielen. Eine nichtlineare Regressionsrechnung anhand der insgesamt 304 Prüfkörper ergibt Gl. (5.11):

$$E(f_{m,u=12\%}) = (30.2 + 0.0810 \cdot \rho_0 - 1.82 \cdot jrb) \cdot \left(\frac{150}{h}\right)^{0.09} \quad (5.11)$$

Abb. 5.12 zeigt das Ergebnis graphisch. Der Korrelationskoeffizient ist mit $r_{\text{SP}} = 0.55$ gering, was mit der relativ kleinen Streubreite der Biegefestigkeitswerte begründet werden kann. Je enger die Streuung der zu untersuchenden Größe ist, desto weniger sagt der Korrelationskoeffizient über die Beziehung der beiden Größen zueinander aus. Darüber hinaus fällt auf, dass die Prüfkörper mit einem $t_{\text{KAR}} \leq 0.05$ eine relativ große Streuung der Biegefestigkeitswerte aufweisen.

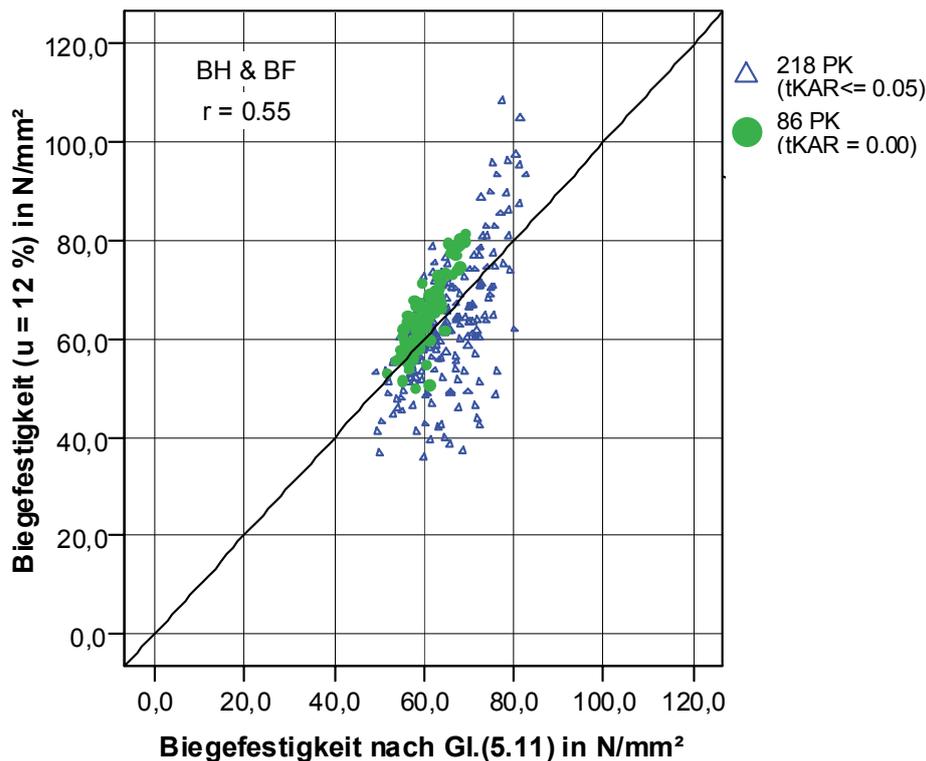


Abb. 5.12: Biegefestigkeit bei u = 12 % über der Biegefestigkeit nach Gl. (5.11), n = 304 PK.

5.3.4.2 Koeffizienten für asthaltige Prüfkörper

In diesem Kapitel soll überprüft werden, ob sich der an ast- und fehlerfreien Prüfkörpern hergeleitete Höhenexponent für asthaltige Prüfkörper wesentlich verändert. Dazu stehen von den 2889 Prüfkörpern nach Abzug der bereits in Kap. 5.3.4 verwendeten 218 Prüfkörper mit tKAR ≤ 0.05 noch 2671 orientiert geprüfte Biegeprüfkörper zur Verfügung.

Da nichtlineare Regressionsrechnungen hoch variabel sind und stark durch Ausreißer oder Besonderheiten der einzelnen Kollektive beeinflusst werden können, müssen nichtlineare Regressionsgleichungen möglichst unabhängig überprüft werden. Dazu bietet sich bei der großen Anzahl zur Verfügung stehender Daten die Teilung der Grundgesamtheit in zwei Teilkollektive an. Wenn gezeigt werden kann, dass eine nichtlineare Regressionsgleichung, angewandt auf ein unabhängiges Teilkollektiv, die Zielgröße für dieses unabhängige Teilkollektiv ähnlich gut vorhersagt wie die Zielgröße bei der Gleichungsherleitung, kann davon ausgegangen werden, dass eine stabile Gleichung erzeugt wurde, die die Zusammenhänge wirklichkeitsgetreu abbildet.

Die hier zu Verfügung stehenden 2671 Prüfkörper werden also in zwei Teilkollektive aufgeteilt. Beide Teilkollektive sollen möglichst den gleichen Querschnittsbereich abdecken, weshalb der Datensatz nach Kollektiv, Querschnitt und zufällig vergebener Prüfkörpernummer geordnet und jede dritte Probe dem Teilkollektiv 2 zugeordnet wird. Teilkollektiv 1 umfasst nach der Teilung 1778 Prüfkörper, Teilkollektiv 2 893 Prüfkörper. Mit Hilfe einer nichtlinearen Regressionsrechnung werden anhand des größeren Teil-

kollektivs 1 die Parameter bestimmt. Eine nichtlineare Regressionsrechnung mit dem Ansatz nach Gl. (5.8) anhand der 1778 Prüfkörper ergibt Gl. (5.12). Abb. 5.13 zeigt das Ergebnis graphisch.

$$E(f_{m,u=12\%}) = (29.4 + 0.0917 \cdot \rho_0 - 2.76 \cdot jrb - 21.8 \cdot tKAR - 31.6 \cdot mKAR) \cdot \left(\frac{150}{h}\right)^{0.10} \quad (5.12)$$

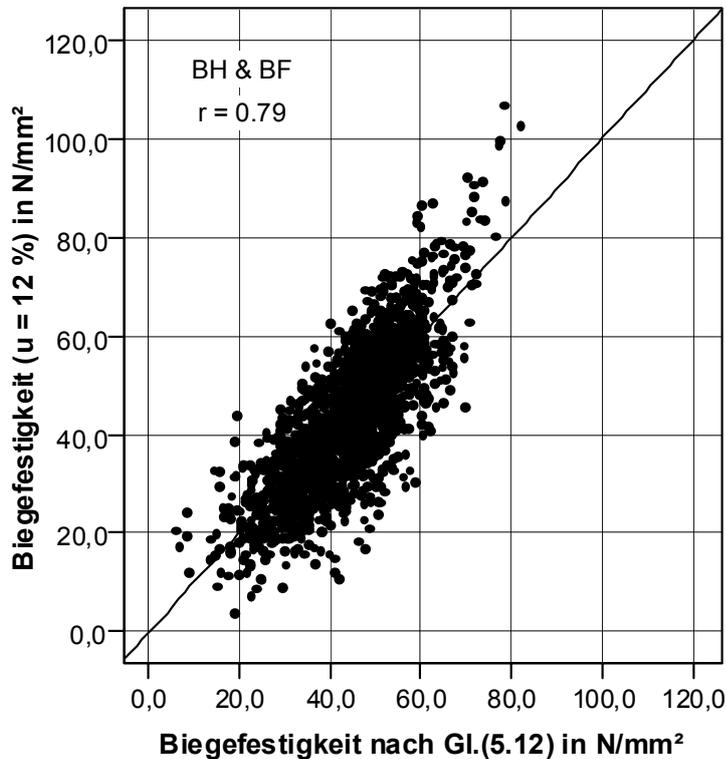


Abb. 5.13: Biegefestigkeit bei $u = 12\%$ über der Biegefestigkeit nach Gl. (5.12), $n = 1778$ PK.

Mit Hilfe von Gl. (5.12) können 62 % der Streuung der Biegefestigkeit erklärt werden. Das Bestimmtheitsmaß ist sehr hoch. Ein Vergleich von Gl. (5.11) für ast- und fehlerfreie Prüfkörper mit Gl. (5.12) für asthaltige Prüfkörper zeigt ähnliche Koeffizienten in beiden Gleichungen: Bei asthaltigen Prüfkörpern weisen die Darr-Rohdichte sowie die Jahrringbreite größere Koeffizienten auf als bei ast- und fehlerfreien Prüfkörpern, die Konstante ist geringfügig kleiner. Diese geringen Unterschiede sind kollektivbedingt und eventuell über die größere Streuung der Darr-Rohdichte und der Jahrringbreite der Prüfkörper dieses Teilkollektivs zu erklären. Der Höhenexponent ist geringfügig größer, liegt aber in der gleichen Größenordnung.

Die Regressionsgerade in Abb. 5.13 liegt auf der Winkelhalbierenden, die Streuwolke ist geradlinig und gleichmäßig parallel um die Winkelhalbierende angeordnet. Ob das Modell die Zusammenhänge zwischen Einflussgrößen und Zielgröße ausreichend gut abbildet, kann anhand der Verteilung der Residuen kontrolliert werden (SACHS & HEDDERICH 2006). Sind die Residuen von der im Versuch ermittelten Biegefestigkeit bei $u = 12\%$ und dem Erwartungswert der Biegefestigkeit nach Gl. (5.12)

normalverteilt, bestätigt dies, dass der Modellansatz die vorhandenen Zusammenhänge sehr gut abbildet. Abb. 5.14 zeigt, dass die Residuen der 1778 Prüfkörper normalverteilt sind.

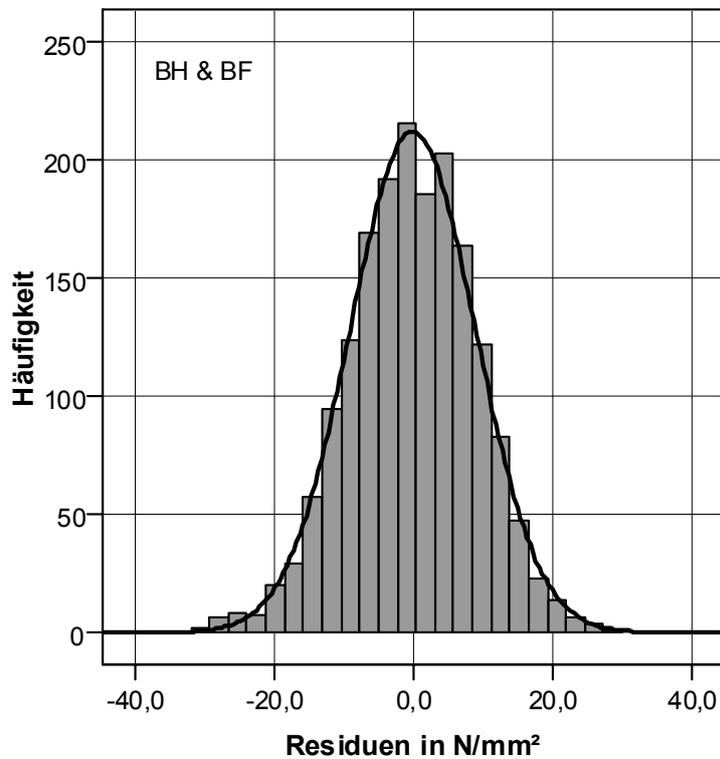


Abb. 5.14: Verteilung der Residuen aus im Versuch ermittelter Biegefestigkeit bei $u = 12\%$ und der Biegefestigkeit nach Gl (5.12), $n = 1778$ PK.

Zur Kontrolle von Gl. (5.12) werden die Erwartungswerte der Biegefestigkeit nach Gl. (5.12) für die 893 Prüfkörper des Teilkollektivs 2 berechnet und die Ergebnisse mit den im Versuch ermittelten Biegefestigkeiten verglichen (Abb. 5.15). Der Korrelationskoeffizient mit $r_{SP} = 0.79$ entspricht dem Korrelationskoeffizienten von Abb. 5.13. Gl. (5.12) erklärt ebenfalls 62 % der Streuung der Biegefestigkeit der 893 Prüfkörper. Aufgrund dieser Kontrolle kann Gl. (5.12) als stabil bezeichnet werden.

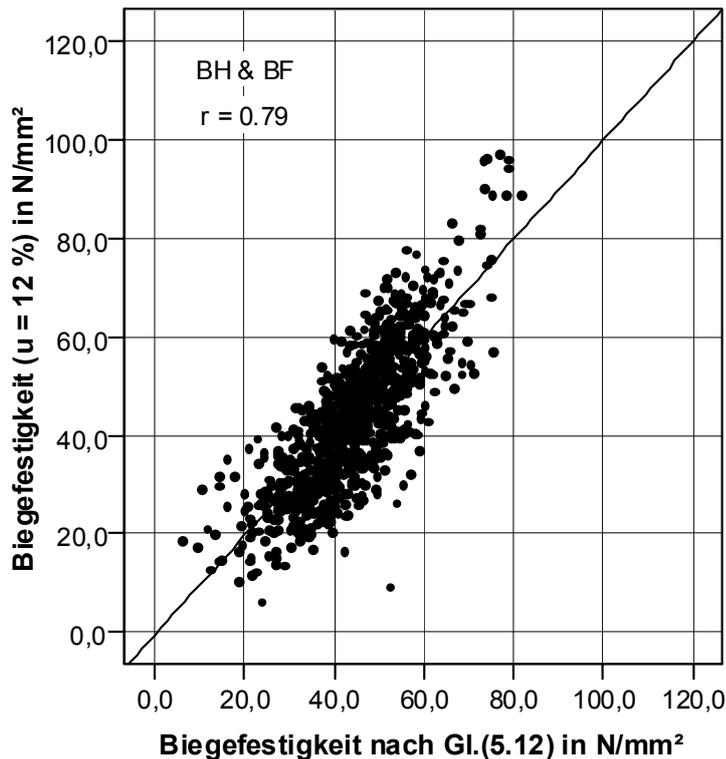


Abb. 5.15: Biegefestigkeit bei $u = 12\%$ über der Biegefestigkeit nach Gl. (5.12), $n = 893$ PK.

Gl. (5.12) gibt damit den Größeneffekt von Fichtenschnittholz bei Standardbedingungen an und teilt die Faktoren entsprechend Abb. 5.10 in den direkten und indirekten Größeneffekt ein:

$$E(f_{m,u=12\%}) = \underbrace{(29.4 + 0.0917 \cdot \rho_0 - 2.76 \cdot jrb - 21.8 \cdot tKAR - 31.6 \cdot mKAR)}_{\text{indirekter Größeneffekt}} \cdot \underbrace{\left(\frac{150}{h}\right)^{0.10}}_{\text{direkter Größeneffekt}} \quad (5.12)$$

5.4 Der direkte Größeneffekt

Der direkte Größeneffekt nach Gl. (5.12) entspricht bei Standardprüfbedingungen der Kombination aus einem direkten Höheneffekt und einem direkten Stützweiteneffekt (Gl. (5.7)), wobei bis zur Klärung dieser Frage der Höheneffekt zur Beschreibung des direkten Größeneffektes gewählt wurde (Kap. 5.3.3.2). Für unterschiedliche Querschnittshöhen ergeben sich nach Gl. (5.12) die in Abb. 5.16 dargestellten direkten Höhenfaktoren (Gl. (5.13)):

$$k_h = \underbrace{\left(\frac{150}{h}\right)^{0.10}}_{\text{direkter Größeneffekt}} \quad (5.13)$$

Die Höhenexponenten der in Kap. 5.3.4 hergeleiteten Gleichungen variieren zwischen $g_0 = 0.09$ und $g_0 = 0.10$. Zur Veranschaulichung sind in Abb. 5.16 direkte Höhenfaktoren bei einer Veränderung des Exponenten g_0 um ± 0.01 dargestellt. Die Variationen der direkten Höhenfaktoren bei einer Veränderung des Exponenten g_0 um ± 0.01 sind sehr gering.

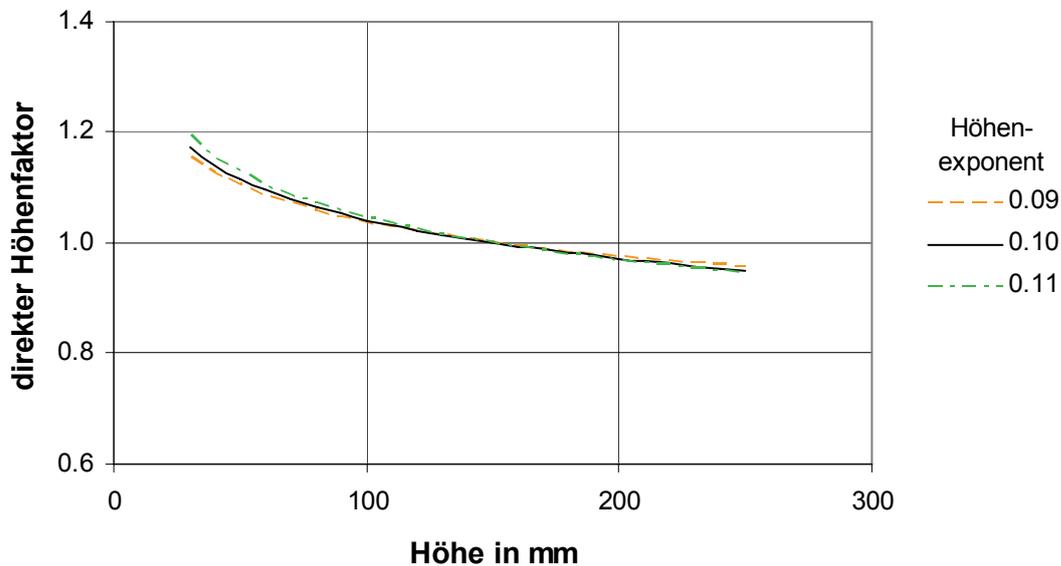


Abb. 5.16: Direkte Höhenfaktoren k_h über der Querschnittshöhe getrennt nach Höhenexponent.

Wäre die Änderung der Querschnittshöhe mit keiner Änderung der Holzeigenschaften verbunden, würden sich aufgrund des direkten Größeneffektes für Querschnittshöhen $h < 150$ mm größere Biegefestigkeitswerte als für Querschnittshöhen $h = 150$ mm ergeben, da die direkten Höhenfaktoren $k_h \geq 1$ sind. An Prüfkörpern mit Querschnittshöhen $h > 150$ mm würden kleinere Biegefestigkeitswerte ermittelt als an Querschnittshöhen mit $h = 150$ mm. Diese Zusammenhänge stimmen mit der in der Literatur angeführten Biegefestigkeitsabnahme mit zunehmender Querschnittshöhe und damit mit den Grundzügen der WEIBULL-Theorie überein.

Um die Auswirkung des direkten Größeneffektes auf die Biegefestigkeit selbst zu veranschaulichen, wird in Abb. 5.17 dargestellt, wie sich der Höhenfaktor in Abhängigkeit des Festigkeitsniveaus auswirkt. Dazu werden die Quantilwerte aller 2889 Prüfkörper bestimmt. Da die Querschnittshöhe aller 2889 Prüfkörper im Mittel bei $h = 133$ mm liegt, werden die Quantilwerte mit Hilfe von Gl. (5.13) auf $h = 150$ mm umgerechnet. Eine Multiplikation der Quantilwerte mit Gl. (5.13) veranschaulicht den direkten Größeneffekt für unterschiedliche Querschnittshöhen (Gl. (5.14)).

$$E_{\text{direkter Größeneffekt}}(f_{m,u=12\%}) = f_{m,\text{Quantile},u=12\%}(h = 150) \cdot \left(\frac{150}{h}\right)^{0.10} \quad (5.14)$$

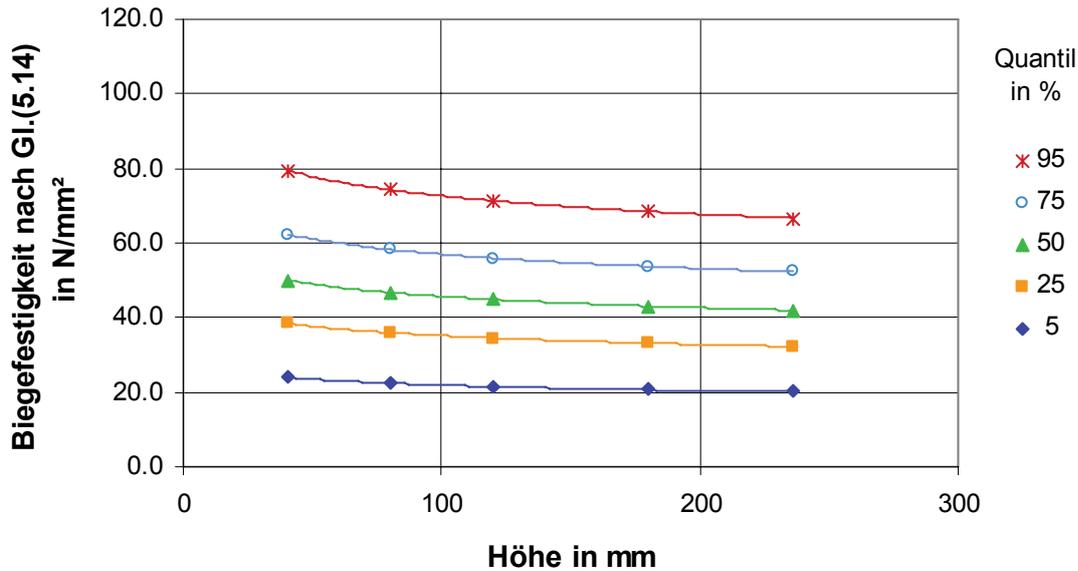


Abb. 5.17: Direkter Größeneffekt nach Gl. (5.14) getrennt nach Quantil, $n = 2889$ PK.

Je geringer die Festigkeitswerte sind, desto geringer ist die absolute Änderung durch den direkten Größeneffekt (Abb. 5.17). Auf dem Niveau des 5%-Quantils ist die absolute Änderung sehr gering. Der in Abb. 5.17 dargestellte direkte Größeneffekt ist ein fiktiver Wert, da sich mit der Querschnittshöhe in Wirklichkeit auch die Holzeigenschaften und mit den Holzeigenschaften auch die Biegefestigkeitswerte ändern.

5.5 Der indirekte Größeneffekt

Der indirekte Größeneffekt beschreibt den Einfluss der veränderten Holzeigenschaften mit sich verändernden Querschnittsabmessungen (Abb. 5.10). Da unter Standardbedingungen sowohl die Querschnittsbreite als auch die Querschnittshöhe Einfluss auf die Holzeigenschaften haben, müssen beim indirekten Größeneffekt beide Querschnittsabmessungen berücksichtigt werden. Um die Auswirkungen einer Änderung der Abmessung auf die Holzeigenschaften abschätzen zu können, werden die 2889 Prüfkörper entsprechend Tab. 3.1 und Abb. 3.2 in jeweils fünf Höhen- und Breitenkategorien eingeteilt. Für jede Kategorie werden die Veränderungen der Holzeigenschaften Darr-Rohdichte, Jahrringbreite und Ästigkeiten t_{KAR} und m_{KAR} dargestellt. Dazu müssen geeignete Verteilungen gewählt werden. Generell bieten sich die Normal-, die Lognormal-, die WEIBULL- oder die Betafunktion als Verteilungsfunktionen an. Die jeweils günstigste Verteilung wird anhand von Wahrscheinlichkeitsplots in Kombination mit statistischen Tests ausgewählt.

Für die Darr-Rohdichte zeigen sowohl die Wahrscheinlichkeitsplots als auch der Test nach DAVID ET AL. (1954) (SACHS & HEDDERICH 2006), dass die Normalverteilung zur Beschreibung geeignet ist. Dies stimmt auch mit EN 408 überein, die zur Berechnung des 5%-Quantils eine Normalverteilung der Darr-Rohdichte unterstellt. Abb. 5.18 und Abb. 5.19 zeigen die Dichtefunktionen der Normalverteilung für die Darr-

Rohdichte getrennt nach jeweils fünf Breiten- und Höhenkategorien. Die Verteilungen der Darr-Rohdichte ändern sich nur wenig mit sich ändernder Querschnittsabmessung. Eine Ausnahme sind Querschnitte mit sehr kleinen Höhen, bei denen die Darr-Rohdichte im Mittel leicht erhöht ist. Verfügbare Querschnitte mit diesen kleinen Höhen waren vor allem Lamellen für Brettschichtholz. Bei diesen kann nicht ausgeschlossen werden, dass sie vorsortiert waren und deshalb höhere Rohdichtewerte aufweisen. Die Zunahme der mittleren Darr-Rohdichte mit abnehmender Querschnittshöhe kann darüber hinaus auch damit erklärt werden, dass Brettquerschnitte auch markfern erzeugt werden und markferne Bereiche eine höhere Rohdichte aufweisen. Die Veränderung der Darr-Rohdichte mit sich änderndem Querschnitt wird im Weiteren vernachlässigt, da sich die Dichtefunktionen der Normalverteilung weder für die Breitenkategorien noch für die Höhenkategorien wesentlich unterscheiden.

Zur Beschreibung der Jahrringbreite eignet sich aufgrund von Häufigkeitsdiagrammen und Wahrscheinlichkeitsplots eine Lognormalverteilung, da die Jahrringbreite nicht symmetrisch verteilt, sondern linkssteil ist. Abb. 5.20 und Abb. 5.21 zeigen die Dichtefunktionen der Lognormalverteilung für die Jahrringbreite getrennt nach jeweils fünf Breiten- und Höhenkategorien. Die Streuung der Jahrringbreite nimmt in beiden Fällen mit zunehmender Querschnittsabmessung ab, während sich die Mittelwerte kaum verändern. Im Weiteren wird eine Veränderung der Jahrringbreite mit sich änderndem Querschnitt vernachlässigt, da diese, wie anschließend gezeigt wird, im Vergleich zur Änderung der Ästigkeit mit sich änderndem Querschnitt gering ist.

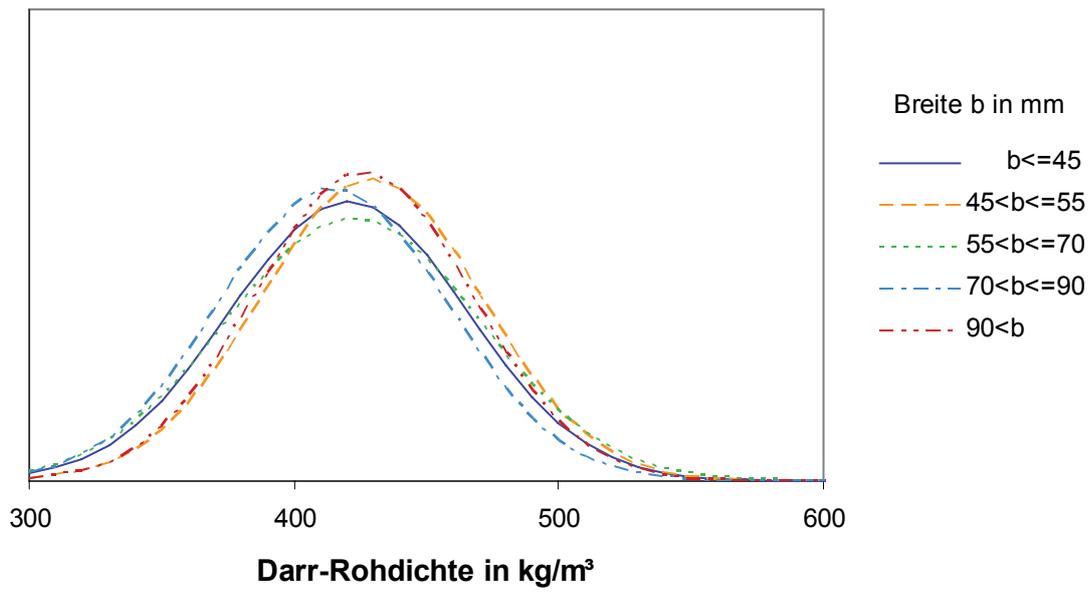


Abb. 5.18: Normalverteilung der Darr-Rohdichte getrennt nach Breitenkategorie, n = 2889 PK.

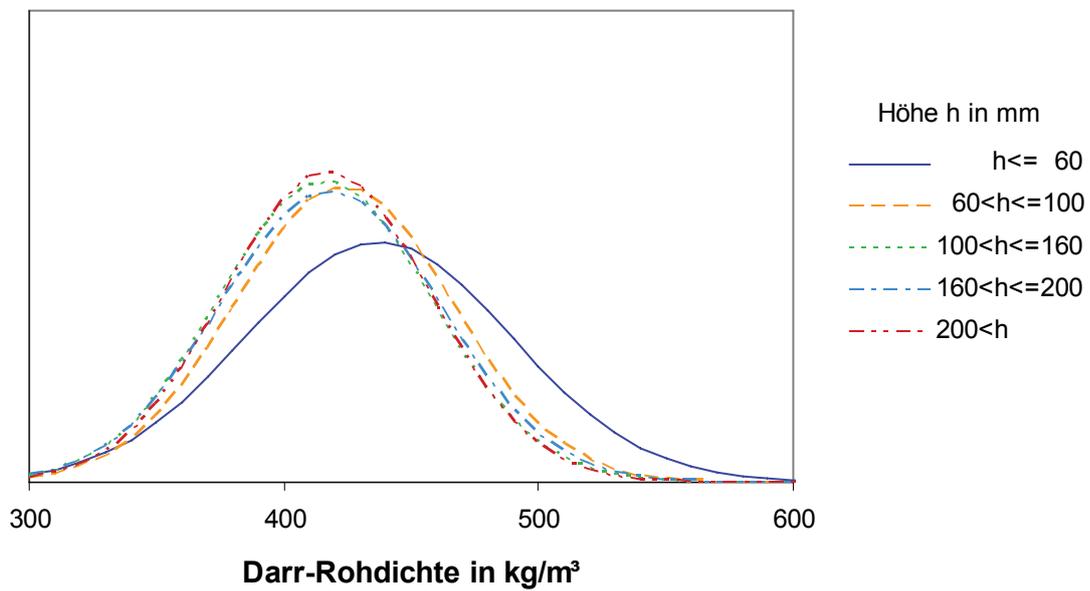
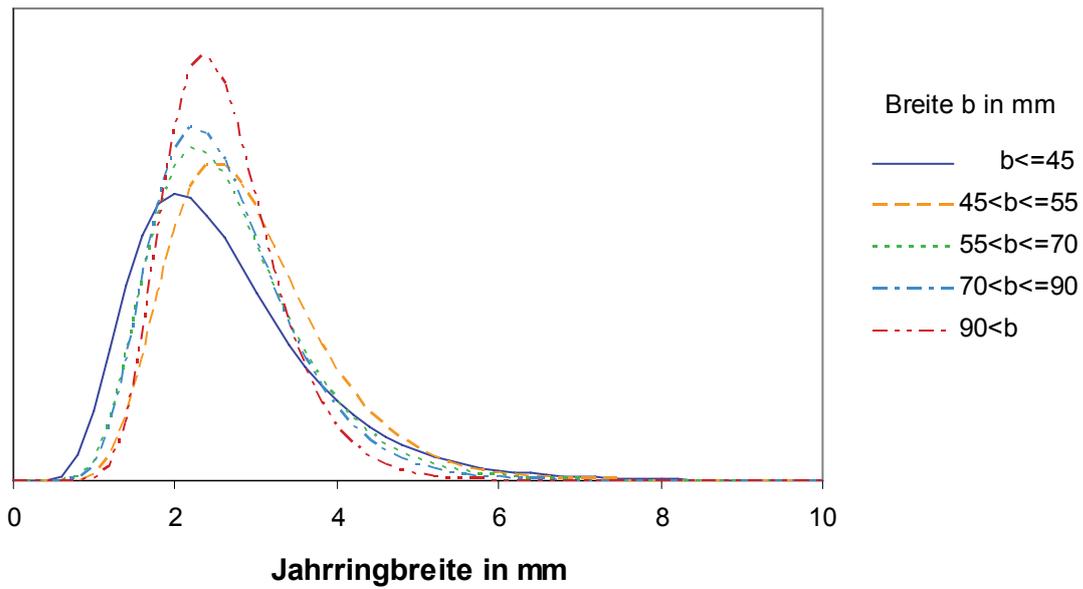
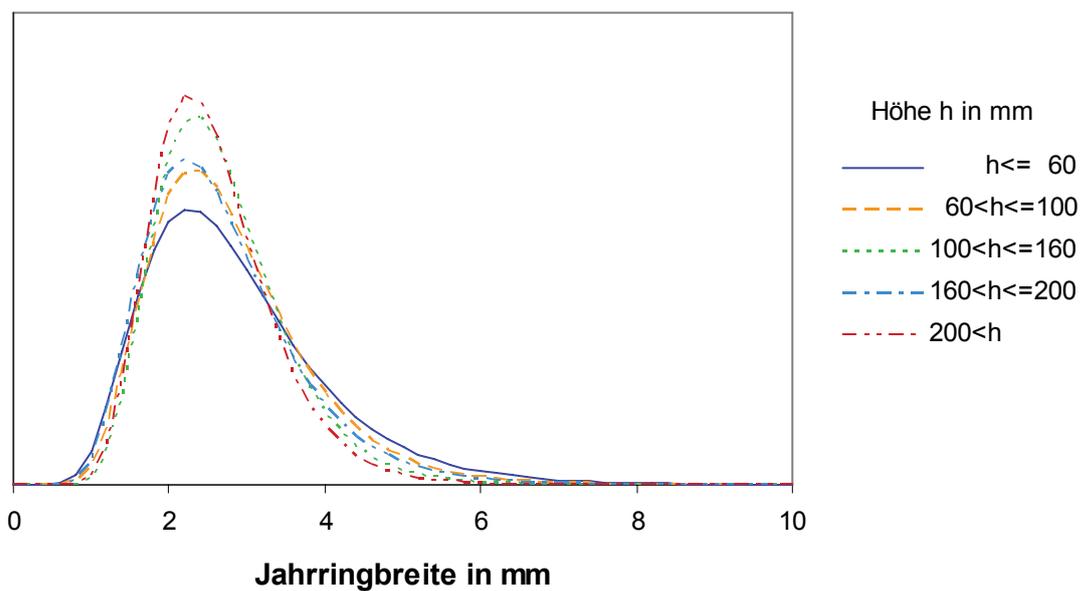
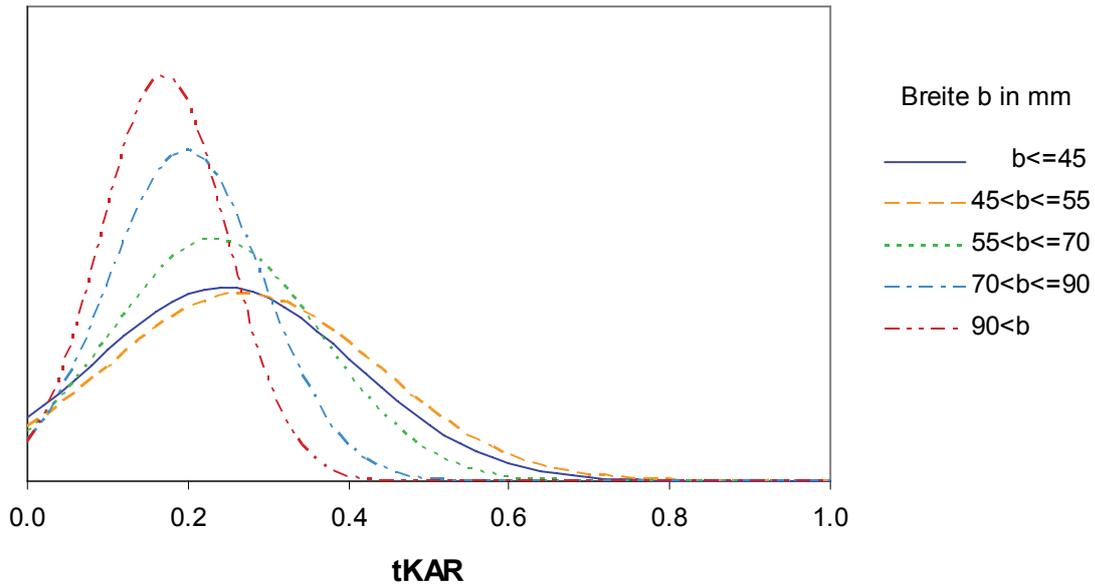
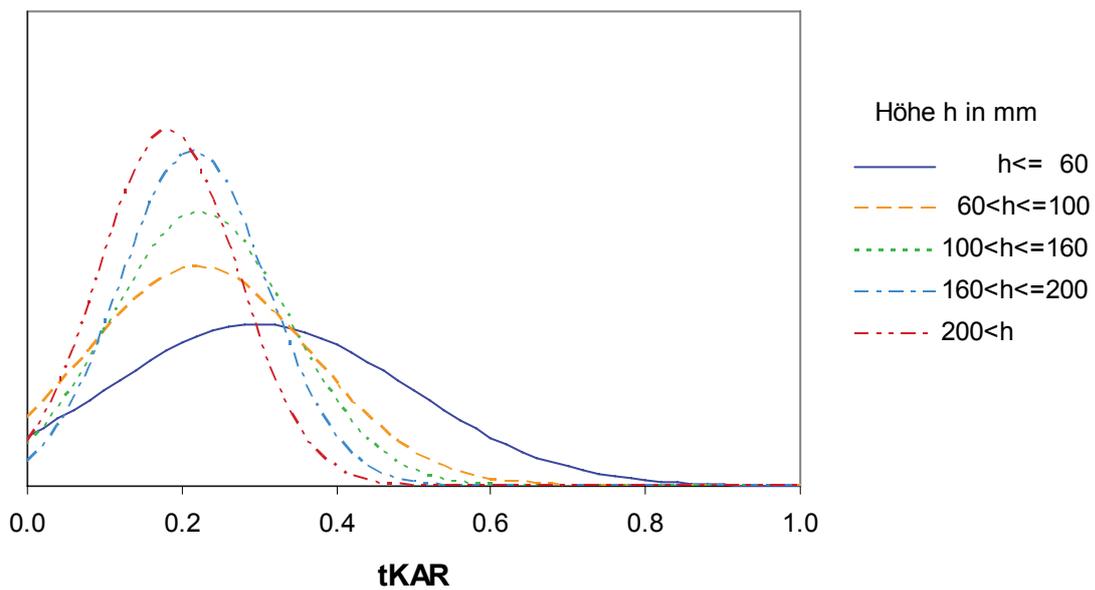


Abb. 5.19: Normalverteilung der Darr-Rohdichte getrennt nach Höhenkategorie, n = 2889 PK.

Abb. 5.20: Lognormalverteilung der Jahringbreite getrennt nach Breitenkategorie, $n = 2889$ PK.Abb. 5.21: Lognormalverteilung der Jahringbreite getrennt nach Höhenkategorie, $n = 2889$ PK.

Für die Ästigkeiten $tKAR$ und $mKAR$ ist die Wahl der Verteilung schwierig. Aufgrund der Wahrscheinlichkeitsplots eignen sich in den unterschiedlichen Querschnittskategorien sowohl die Normalverteilung als auch die Betaverteilung, wobei die Betaverteilung leichter an die Versuchsdaten angepasst werden kann. Nachteil der Betaverteilung ist, dass Ästigkeiten mit dem Wert $tKAR = 0$ oder $mKAR = 0$ durch die Verteilung nicht abgedeckt werden können. Dieses Problem kann entweder durch Überlagerung der Betaverteilung mit der Heaviside-Funktion gelöst werden oder direkt durch Verwendung der Normalverteilung, die für die Werte $tKAR = 0$ und $mKAR = 0$ definiert ist. Da die Normalverteilung im Vergleich zur Betaverteilung nur eine geringfügig schlechtere Anpassung liefert und ein Test auf Normalverteilung (DAVID ET AL. 1954 aus SACHS & HEDDERICH 2006) deren Anwendbarkeit bestätigt, wird die Normalverteilung zur Beschreibung der Ästigkeit $tKAR$ und $mKAR$ verwendet.

Abb. 5.22 bis Abb. 5.25 zeigen die Dichtefunktionen der Normalverteilung für die Ästigkeiten $tKAR$ und $mKAR$ getrennt nach Breiten- und Höhenkategorien. Erwartungsgemäß überschreitet die Streuung des $mKAR$ die Streuung des $tKAR$ in beiden Fällen. Abb. 5.22 zeigt, dass sich die Verteilung des $tKAR$ innerhalb der Breitenkategorien deutlich verändert: Mit zunehmender Querschnittsbreite nimmt sowohl der Anteil an astfreien Proben als auch die Streuung des $tKAR$ ab. Im Mittel wird die Ästigkeit $tKAR$ mit zunehmender Querschnittsbreite geringer. Da die Ästigkeit mit zunehmender Querschnittsabmessung nicht beliebig zunimmt, nimmt mit zunehmender Querschnittsabmessung der Anteil an Prüfkörpern mit hohem $tKAR$ ab. Dieser Zusammenhang bewirkt die Abnahme der Streuung und die Abnahme des Mittelwertes mit zunehmender Querschnittsbreite. Aus Abb. 5.23 lassen sich ähnliche Zusammenhänge für den Einfluss der Querschnittshöhe auf die Verteilung der Ästigkeit $tKAR$ ableiten. Da die Ästigkeit $mKAR$ generell stärker streut als die Ästigkeit $tKAR$, sind die Zusammenhänge beim $mKAR$ nicht so stark ausgeprägt. Abb. 5.24 zeigt die Verteilungen des $mKAR$ für unterschiedliche Breitenkategorien. Sowohl die Streuung als auch der Mittelwert nehmen mit zunehmender Querschnittsbreite ab. Aufgrund der größeren Querschnittsdimension ist auch die Streuung des $mKAR$ innerhalb der Höhenkategorien (Abb. 5.25) größer als die Streuung innerhalb der Breitenkategorien (Abb. 5.24). Die Mittelwerte der Ästigkeit $mKAR$ und deren Streuungen nehmen mit zunehmender Querschnittsabmessung stark ab.

Abb. 5.22: Normalverteilung der Ästigkeit tKAR getrennt nach Breitenkategorie, $n = 2889$ PK.Abb. 5.23: Normalverteilung der Ästigkeit tKAR getrennt nach Höhenkategorie, $n = 2889$ PK.

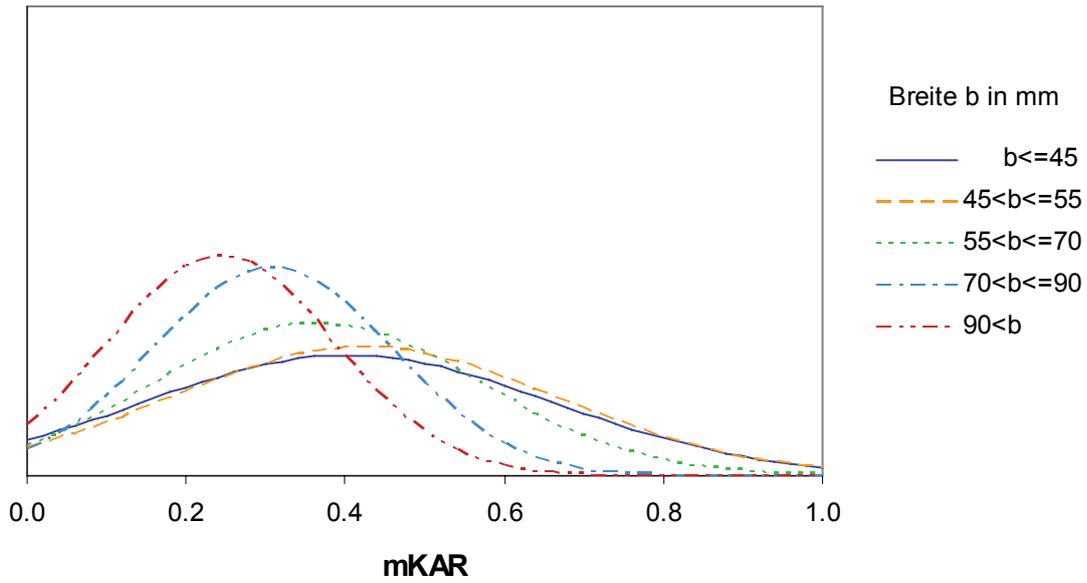


Abb. 5.24: Normalverteilung der Ästigkeit mKAR getrennt nach Breitenkategorie, n = 2889 PK.

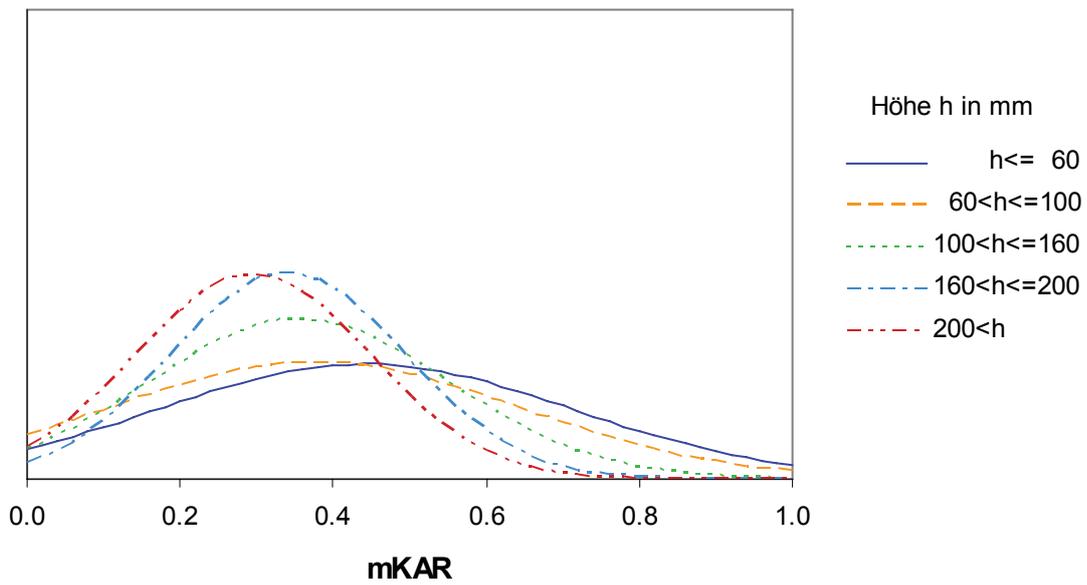


Abb. 5.25: Normalverteilung der Ästigkeit mKAR getrennt nach Höhenkategorie, n = 2889 PK.

Der indirekte Größeneffekt nach Abb. 5.10 ist folglich zu einem großen Teil auf den geometrischen Einfluss der Prüfkörperabmessungen auf die Ästigkeit zurückzuführen. Die geometrischen Einflüsse auf die Darr-Rohdichte und die Jahrringbreite sind im Gegensatz dazu gering. Mit Hilfe von Gl. (5.12) lassen sich die indirekten Größeneffekte in den unterschiedlichen Breiten- und Höhenkategorien darstellen, indem die indirekten Anteile aus Gl. (5.12) für unterschiedliche Biegefestigkeitsquantile in den jeweiligen Höhen- und Breitenkategorien berechnet werden (Gl. (5.15)).

$$E_{\text{indirekter Größeneffekt}}(f_{m,u=12\%}) = \underbrace{(29.4 + 0.0917 \cdot \rho_0 - 2.76 \cdot jrb - 21.8 \cdot tKAR - 31.6 \cdot mKAR)}_{\text{indirekter Größeneffekt}} \quad (5.15)$$

Die Biegefestigkeit nach Gl. (5.15) ist in Abb. 5.26 über der Querschnittsbreite und in Abb. 5.27 über der Querschnittshöhe getrennt nach Quantil dargestellt. Innerhalb jeder Kategorie wurde für jeden Prüfkörper der Erwartungswert nach Gl. (5.15) aufgrund der in dieser Kategorie zur Verfügung stehenden Versuchsdaten berechnet. Aus diesen Erwartungswerten wurden in jeder Kategorie die unterschiedlichen Quantilwerte verteilungsfrei bestimmt. Da die Geradensteigungen stark kollektivabhängig sind, können diese nur Tendenzen aufzeigen und sollten nicht überbewertet werden. Auf dem 95%-Quantilniveau nimmt in beiden Diagrammen die Biegefestigkeit mit zunehmender Querschnittsabmessung leicht ab. Ab dem 50%-Quantilniveau und geringer nimmt die Biegefestigkeit mit zunehmender Querschnittsabmessung zu. Dies entspricht der Vorstellung, dass mit zunehmender Querschnittsabmessung die Ästigkeit ab- und damit die Festigkeit zunimmt.

Eine Zunahme der Biegefestigkeit mit zunehmender Querschnittsabmessung widerspricht der WEIBULL-Theorie. Allerdings geht die WEIBULL-Theorie von isotropen Materialeigenschaften und regulärem Material aus (Kap. 2.3.2), was dazu führt, dass Änderungen der Materialeigenschaften mit sich ändernder Querschnittsgröße nicht berücksichtigt werden können. Indirekt wirken sich die Querschnittsbreite und die Querschnittshöhe in gleicher Weise auf die Biegefestigkeit aus: Für schlechtes Material nimmt die Biegefestigkeit mit zunehmender Holzabmessung zu, da mit zunehmender Holzabmessung die Ästigkeit abnimmt. Bei sehr gutem Material bleibt die Biegefestigkeit nahezu unverändert, da die Prüfkörper weitgehend astfrei sind und die Darr-Rohdichte und die Jahrringbreite durch die Holzabmessung nicht wesentlich beeinflusst werden.

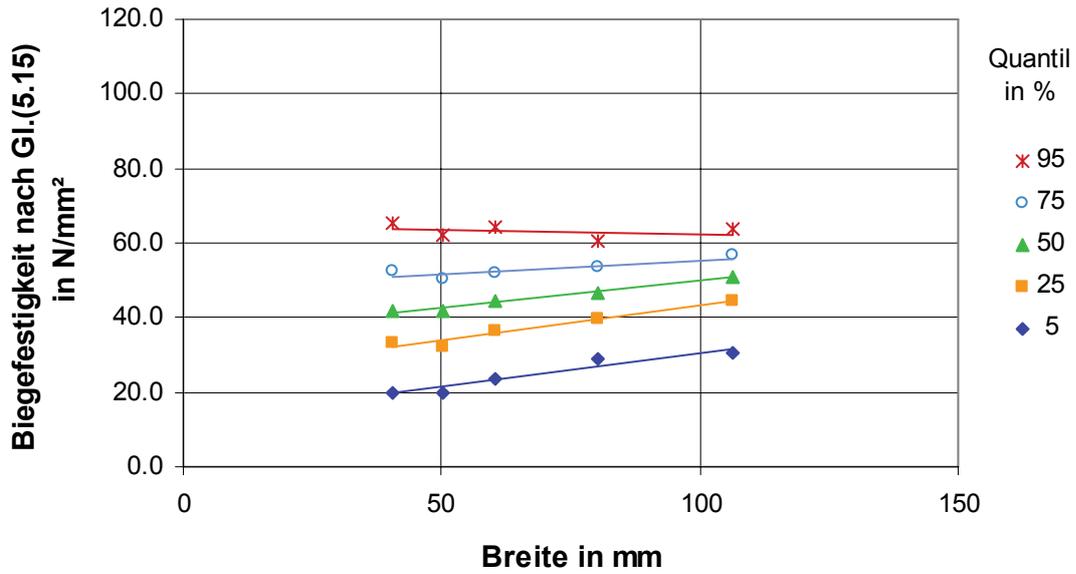


Abb. 5.26: Indirekter Größeneffekt nach Gl. (5.15) über der Querschnittsbreite getrennt nach Quantil, n = 2889 PK.

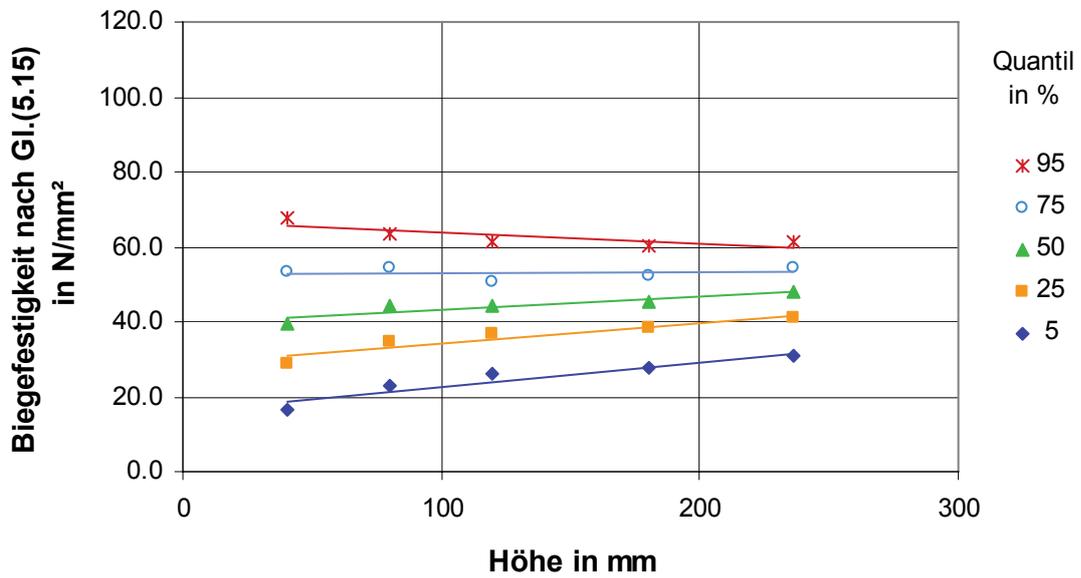


Abb. 5.27: Indirekter Größeneffekt nach Gl. (5.15) über der Querschnittshöhe getrennt nach Quantil, n = 2889 PK.

5.6 Der wirksame Größeneffekt

Der Begriff „wirksamer“ Größeneffekt bezeichnet die Kombination aus direktem und indirektem Größeneffekt und entspricht dem bei der Bestimmung der Biegefestigkeit unmittelbar messbaren Größeneffekt (Abb. 5.10).

Da die Querschnittsbreite keinen direkten Einfluss auf die Biegefestigkeit besitzt, stellt Abb. 5.26 das Ergebnis des wirksamen Größeneffektes über der Breite dar, wenn der direkte Einfluss der Querschnittshöhe den indirekten Breiteneinfluss nicht verändert. Um dies zu überprüfen, wurden innerhalb der fünf Breitenkategorien die Quantilwerte anhand der insgesamt 2889 Prüfkörper mittels WEIBULL-Verteilungen bestimmt und diese einschließlich der Biegefestigkeitswerte in Abb. 5.28 über der Breite dargestellt. Die jeweiligen Quantilwerte sind durch Potenzfunktionen verbunden.

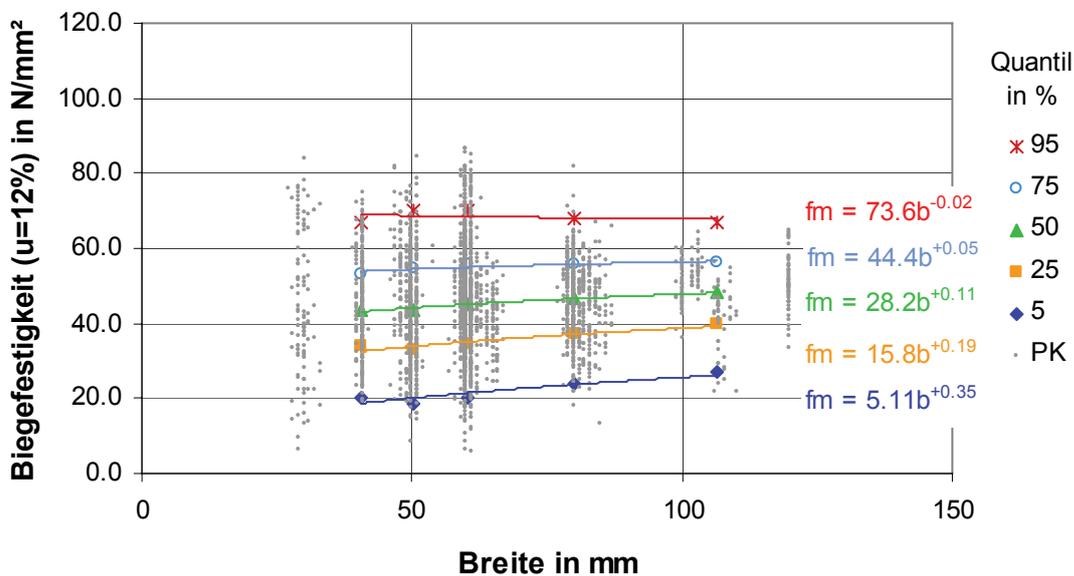


Abb. 5.28: Wirksamer Breiteneffekt über der Querschnittsbreite getrennt nach über WEIBULL-Verteilung bestimmtem Quantil, $n = 2889$ PK.

(Als Stützstellen der Quantilwerte wurden die Mediane der Kollektive verwendet.)

Der Einfluss der Breite auf die Biegefestigkeit hängt vom Festigkeitsniveau und damit von der Holzqualität ab. Für hochwertige Schnitthölzer bleibt die Biegefestigkeit mit zunehmender Breite nahezu unverändert, für Schnitthölzer geringer Qualität nimmt die Biegefestigkeit mit zunehmender Breite zu.

Der wirksame Größeneffekt der Querschnittshöhe stellt eine Kombination von Abb. 5.17 und Abb. 5.27 dar. Abb. 5.29 zeigt die Ergebnisse der Biegefestigkeit bei $u = 12\%$ über der Querschnittshöhe und die mittels WEIBULL-Verteilungen innerhalb der fünf Höhenkategorien bestimmten Quantilwerte einschließlich der Biegefestigkeitswerte der 2889 Prüfkörper. Auch hier sind die Quantilwerte durch Potenzfunktionen verbunden. Der indirekte Einfluss der Querschnittshöhe auf die Biegefestigkeit wird durch die Über-

lagerung auf hohem Festigkeitsniveau verstärkt, während er auf niedrigem Festigkeitsniveau abgeschwächt wird.

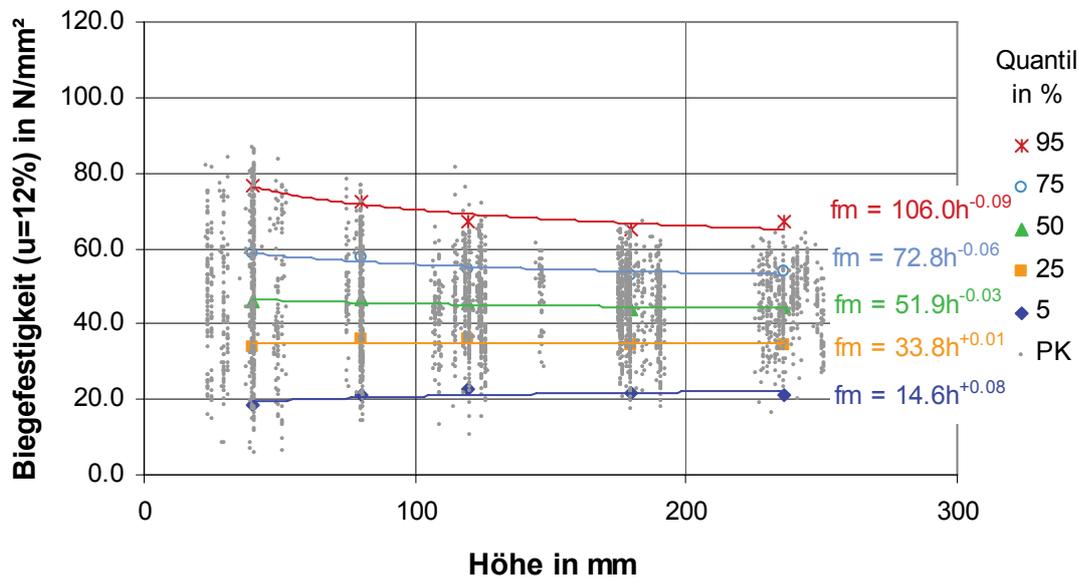


Abb. 5.29: Wirksamer Größeneffekt über der Querschnittshöhe getrennt nach über WEIBULL-Verteilung bestimmtem Quantil, $n = 2889$ PK.

(Als Stützstellen der Quantilwerte wurden die Mediane der Kollektive verwendet.)

Der Einfluss der Querschnittshöhe auf die Biegefestigkeit ist ebenfalls vom Festigkeitsniveau abhängig. Für hochwertige Schnitthölzer nimmt die Biegefestigkeit mit zunehmender Querschnittshöhe ab. Auf dem Niveau des 5%-Quantils nimmt die Biegefestigkeit mit zunehmender Querschnittshöhe zu.

Für unsortiertes Schnittholz nimmt die Biegefestigkeit mit zunehmender Querschnittsbreite auf dem Niveau des 50%-Quantils leicht zu (Abb. 5.28), während sie mit zunehmender Querschnittshöhe leicht abnimmt (Abb. 5.29). Auf dem Niveau des 5%-Quantils nimmt die Biegefestigkeit für unsortiertes Schnittholz mit zunehmender Querschnittsabmessung zu. Die Biegefestigkeit ast- und fehlerfreier Prüfkörper, die hauptsächlich im 95%-Quantil zu finden ist, nimmt sowohl mit zunehmender Querschnittsbreite als auch mit zunehmender Querschnittshöhe ab. Hier zeigt sich der direkte Einfluss der Querschnittshöhe auf die Biegefestigkeit, der bewirkt, dass die Biegefestigkeit durch die Querschnittshöhe reduziert wird.

An dieser Stelle kann erläutert werden, warum nicht der Ansatz entsprechend Gl. (5.9) zur Beschreibung der Biegefestigkeit gewählt wurde: Durch die Überlagerung des direkten mit dem indirekten Größeneffekt verändern sich die Biegefestigkeiten auf unterschiedlichem Festigkeitsniveau unterschiedlich stark. Der indirekte Größeneffekt bewirkt, dass sich durch die Überlagerung mit dem direkten Größeneffekt unterschiedliche Höhenexponenten ergeben, falls im Modell der indirekte Größeneffekt nicht berücksichtigt wird. Da Gl. (5.12) beide Größeneffekte enthält und somit auf unterschiedlichem Quantilniveau

die vorhandenen, unterschiedlichen Steigungen abbilden kann, ist ein Ansatz entsprechend Gl. (5.9) nicht notwendig.

5.7 Zusammenfassung zum Größeneffekt bei Standardbedingungen

Der Größeneffekt bei Standardbedingungen kann für Schnittholz durch Gl. (5.12) beschrieben werden:

$$E(f_{m,u=12\%}) = \underbrace{(29.4 + 0.0917 \cdot \rho_0 - 2.76 \cdot jrb - 21.8 \cdot tKAR - 31.6 \cdot mKAR)}_{\text{indirekter Größeneffekt}} \cdot \underbrace{\left(\frac{150}{h}\right)^{0.10}}_{\text{direkter Größeneffekt}} \quad (5.12)$$

wirksamer Größeneffekt

Unter dem Begriff Standardbedingungen wird im Rahmen dieser Arbeit eine Biegeprüfung mit einem Prüfverhältnis von $s/h = 18$ und Krafterleitung in den Drittelpunkten verstanden. Die größte Ästigkeit $tKAR$ ist in Längsrichtung systematisch zwischen den Krafterleitungspunkten und die größte Ästigkeit $mKAR$ im Querschnitt in der Biegezugseite („orientiert“) angeordnet.

Durch das vorgeschriebene Prüfverhältnis kann der Längeneffekt nicht vom Höheneffekt getrennt werden. Die Kombination aus beiden Effekten wurde auf die Querschnittshöhe bezogen, weshalb Gl. (5.12) nur einen Höheneffekt enthält. Der Einfluss der Breite wird durch die Holzeigenschaften abgedeckt. Ein direkter Breiteneinfluss besteht nicht. Der direkte Einfluss der Querschnittshöhe auf die Biegefestigkeit ist unabhängig vom Quantilniveau und kann Abb. 5.30 entnommen werden.

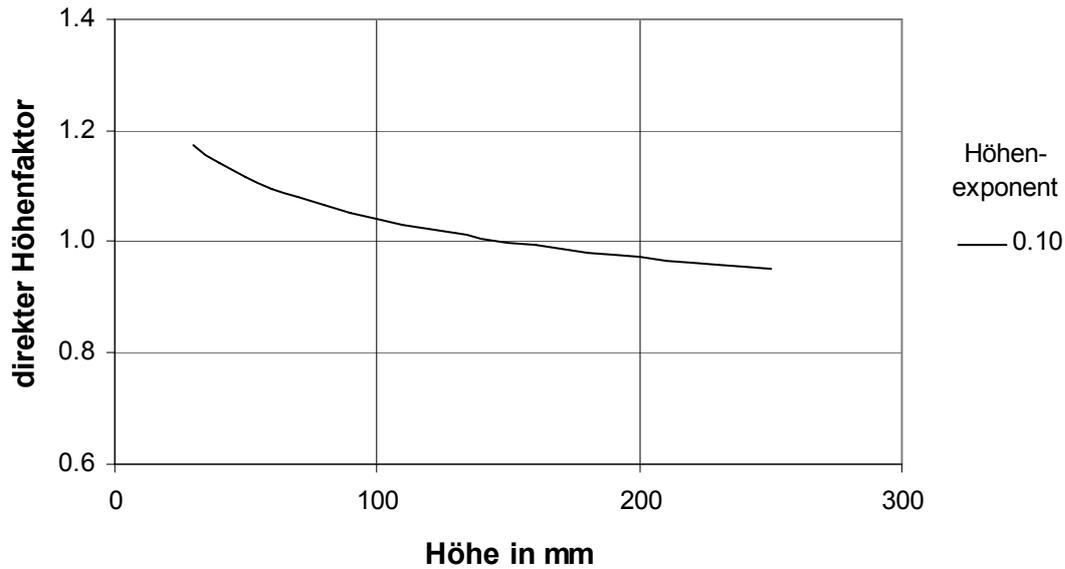


Abb. 5.30: Direkter Höhenfaktor nach Gl. (5.12).

Der indirekte Einfluss von Querschnittsbreite und Querschnittshöhe auf die Biegefestigkeit basiert hauptsächlich auf den sich verändernden Ästigkeiten t_{KAR} und m_{KAR} mit sich verändernden Querschnittsabmessungen und ist abhängig vom Festigkeitsniveau. Die indirekten Größeneffekte sind nur theoretisch vom direkten Größeneffekt zu trennen. Die Kombination aus direktem und indirektem Größeneffekt, der wirksame Größeneffekt, ist ebenfalls abhängig vom Festigkeitsniveau, da die indirekten Größenfaktoren vom Festigkeitsniveau abhängig sind. Abb. 5.31 zeigt den wirksamen Breitenfaktor, der sich innerhalb von fünf Breitenkategorien ergibt, bezogen auf eine Breite von $b = 75$ mm. Abb. 5.32 zeigt den wirksamen Höhenfaktor, der sich innerhalb von fünf Höhenkategorien ergibt, bezogen auf eine Querschnittshöhe von $h = 150$ mm. Der Einfluss der Querschnittsbreite ist auf dem Niveau des 75%-Quantils gering, auf dem Niveau des 5%-Quantils nimmt die Biegefestigkeit mit zunehmender Querschnittsbreite zu. Der Einfluss der Querschnittshöhe ist auf dem Niveau des 50%-Quantils gering, auf dem Niveau des 5%-Quantils nimmt die Biegefestigkeit mit zunehmender Querschnittshöhe leicht zu.

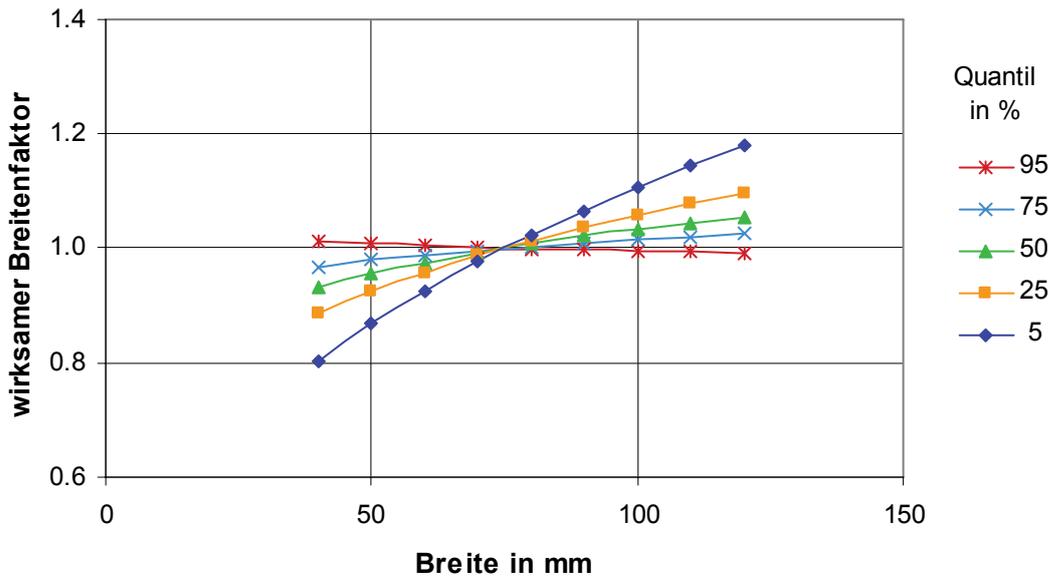


Abb. 5.31: Wirksamer Breitenfaktor getrennt nach Quantil, n = 2889 PK

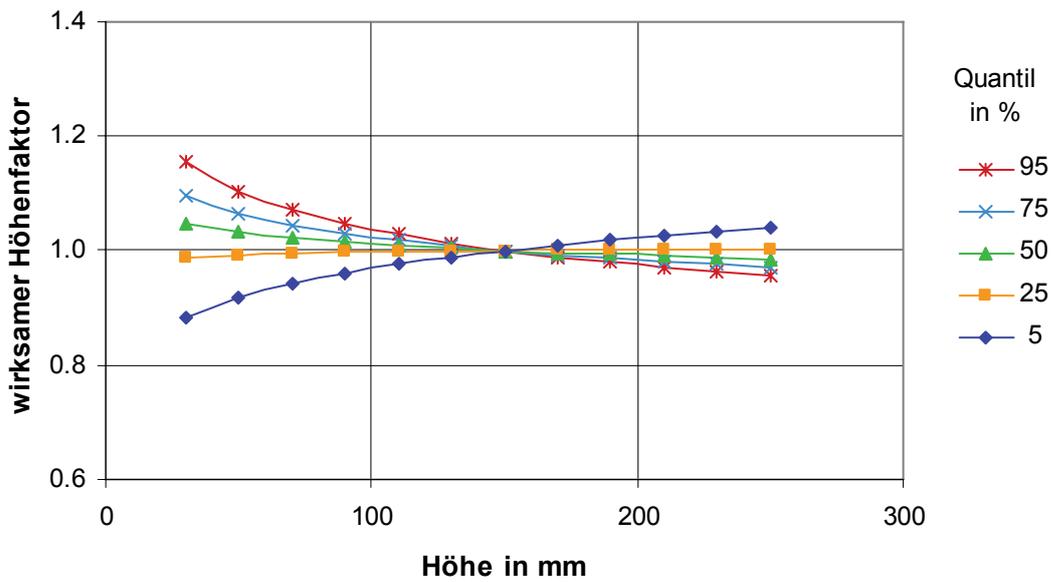


Abb. 5.32: Wirksamer Höhenfaktor getrennt nach Quantil, n = 2889 PK.

6. Einfluss anderer Prüfbedingungen auf den Größeneffekt

6.1 Beliebige Lage der größten Ästigkeit im Querschnitt

EN 384 schreibt vor, dass bei der Biegeprüfung die Zugseite zufällig auszuwählen ist. Bei den in Kap. 5 verwendeten Versuchen wurde die größte Ästigkeit immer im Biegezugbereich angeordnet. Deshalb weichen die dort definierten Standardbedingungen in der Anordnung der größten Ästigkeit mKAR im Querschnitt von der Vorgabe in EN 384 ab. In diesem Kapitel soll geklärt werden, ob sich der Größeneffekt bei beliebiger Anordnung der größten Ästigkeit im Querschnitt wesentlich vom Größeneffekt bei orientierter Anordnung im Querschnitt unterscheidet.

Dazu wird geprüft, ob Gl. (5.12) auch zur Beschreibung der Biegefestigkeit bei beliebiger Lage der größten Ästigkeit im Querschnitt verwendet werden kann. Abb. 6.1 zeigt die im Versuch bestimmte Biegefestigkeit der 517 Prüfkörper, die bei beliebiger Lage der größten Ästigkeit geprüft wurden, getrennt nach Lage der größten Ästigkeit in der Biegezug- und der Biegedruckzone über der Querschnittshöhe. Getrennt nach Teilkollektiv wurde eine Regressionsrechnung mit Potenzfunktion mit dem Ansatz $E(f_{m,u=12\%}) = c_0 \cdot h^{h_0}$ durchgeführt. Die 517 Biegeprüfkörper setzen sich aus fünf Querschnitten zusammen (38x90 mm², 38x140 mm², 38x183 mm², 38x235 mm² und 50x175 mm²), die alle hochkant biegegeprüft wurden. Dies sind Querschnittsmaße, die vornehmlich im US-amerikanischen Raum verwendet werden. Deshalb werden diese Prüfkörper auch in Kap. 7.3 zur Untersuchung der Auswirkung der amerikanischen Sortierung verwendet.

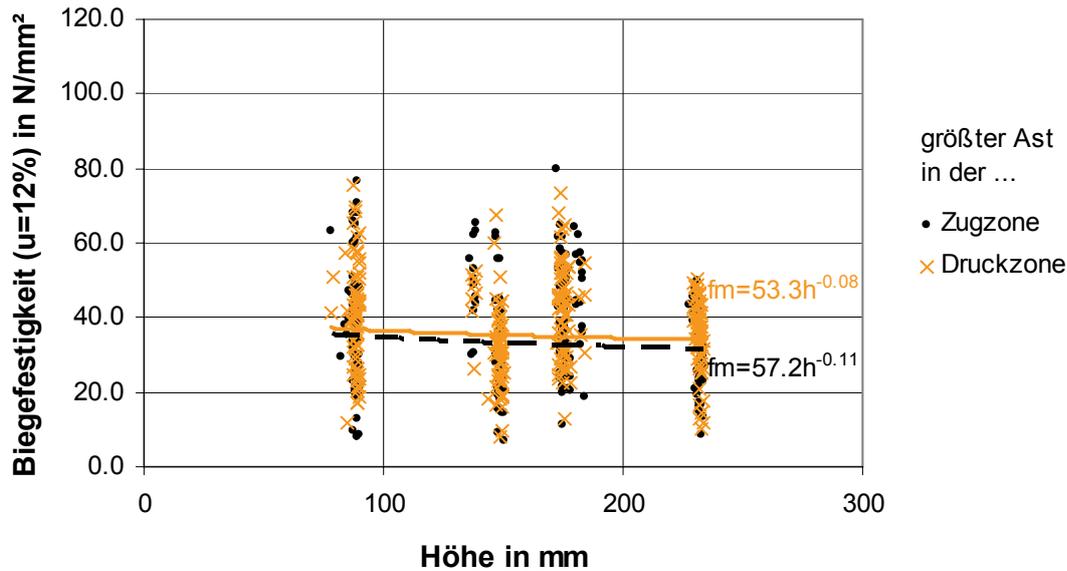


Abb. 6.1: Biegefestigkeit bei $u = 12\%$ über Querschnittshöhe getrennt nach Lage der größten Ästigkeit, $n = 517$ PK.

Abb. 6.1 zeigt, dass die getrennt eingezeichneten Regressionskurven für beide Astanordnungsarten annähernd parallel verlaufen und damit, dass der Einfluss der Querschnittshöhe auf die Biegefestigkeit offensichtlich nicht von der Lage des größten Astes abhängt. Darüber hinaus zeigt Abb. 6.1, dass die Prüfkörper mit der größten Ästigkeit in der Druckzone keine wesentlich größere Streuung der Biegefestigkeit aufweisen als die orientierten Prüfkörper. Erwartungsgemäß überschreitet die Biegefestigkeit der Prüfkörper mit der größten Ästigkeit in der Biegedruckzone im Mittel die Biegefestigkeit der Prüfkörper mit der größten Ästigkeit in der Biegezugzone, da Äste im Biegezugbereich die Biegefestigkeit stärker beeinflussen als Äste im Biegedruckbereich. Dieser Biegefestigkeitsunterschied zwischen Prüfkörpern mit der größten Ästigkeit in der Biegezugzone und Prüfkörpern mit der größten Ästigkeit in der Biegedruckzone ist auf dem Niveau des 5%-Quantils ausgeprägter (GLOS & DENZLER 2004 a). Die charakteristische Biegefestigkeit wird deshalb vor allem von Prüfkörpern mit der größten Ästigkeit in der Biegezugzone bestimmt. Gl. (5.12) beschreibt folglich den Größeneffekt auf dem Niveau des 5%-Quantils sehr gut, da sie an Prüfkörpern mit der größten Ästigkeit in der Biegezugzone hergeleitet wurde. Da sich der Einfluss der Querschnittshöhe auf die Biegefestigkeit im Mittel nicht mit der Lage der größten Ästigkeit im Querschnitt ändert, kann Gl. (5.12) auch herangezogen werden, um den Größeneffekt bei zufälliger Lager der größten Ästigkeit im Querschnitt zu beschreiben.

6.2 Beliebiges Prüfverhältnis

Der in Kap. 5 behandelte Größeneffekt bezieht sich auf ein konstantes Prüfverhältnis von $s/h = 18$. Dadurch kann ein eventuell vorhandener Längeneffekt nicht von einem Höheneffekt getrennt werden, weshalb Gl. (5.12) nur einen Höhenfaktor enthält. Weicht das Prüfverhältnis von $s/h = 18$ ab, muss der

Größeneffekt in einen Höhen- und Längeneffekt aufgeteilt und mit dem Ansatz nach Gl. (5.7) neu berechnet werden. Abb. 6.2 zeigt die theoretische Einteilung des Größeneffektes bei beliebigem Prüfverhältnis. In Abb. 6.2 ist kein direkter Breitenefekt enthalten, da in Kap. 5.3.3 gezeigt wurde, dass die Querschnittsbreite keinen direkten Einfluss auf die Biegefestigkeit besitzt und dies unabhängig vom Prüfverhältnis gültig ist.

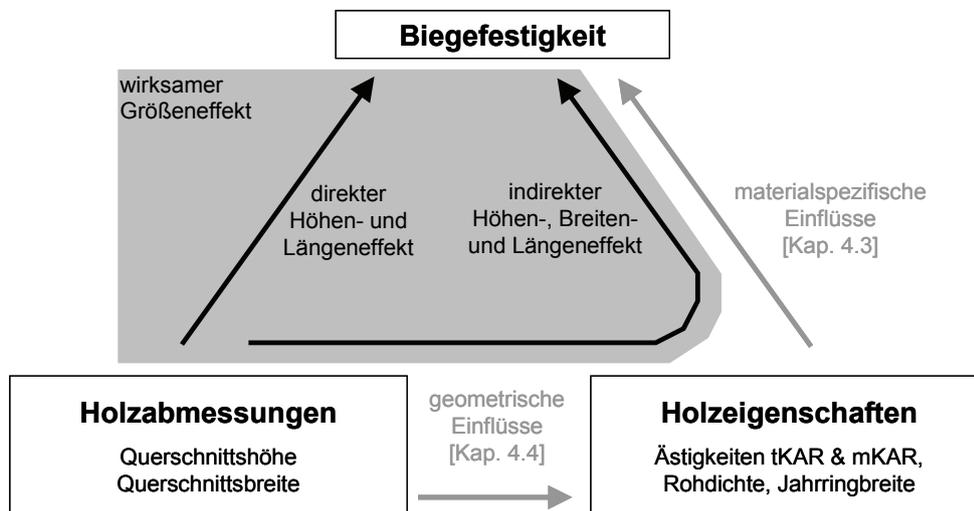


Abb. 6.2: Einteilung des Größeneffektes bei beliebigem Prüfverhältnis s/h .

Da in Gl. (5.12) bereits ein geeigneter Term zur Berechnung der Biegefestigkeit aufgrund der Holzeigenschaften hergeleitet wurde, lautet der Modellansatz für die Biegefestigkeit entsprechend Gl. (5.7) und Gl. (5.12) (Gl. (6.1)):

$$E(f_{m,u=12\%}) = (29.4 + 0.0917 \cdot \rho_0 - 2.76 \cdot jrb - 21.8 \cdot tKAR - 31.6 \cdot mKAR) \cdot \left(\frac{150}{h}\right)^{h_0} \cdot \left(\frac{2700}{s}\right)^{s_0} \quad (6.1)$$

Die Auswertung aller 2889 Prüfkörper unter Einbeziehung der 257 fehlerfreien Prüfkörper aus Kap. 5.3.4 ergibt:

$$E(f_{m,u=12\%}) = (29.4 + 0.0917 \cdot \rho_0 - 2.76 \cdot jrb - 21.8 \cdot tKAR - 31.6 \cdot mKAR) \cdot \left(\frac{150}{h}\right)^{0.04} \cdot \left(\frac{2700}{s}\right)^{0.06} \quad (6.2)$$

Die Summe der Exponenten des direkten Größeneffektes $g_0 = h_0 + s_0 = 0.04 + 0.06 = 0.10$ von Gl. (6.2) entspricht dem Exponenten von Gl. (5.12). Die berechnete Gleichung weist einen Korrelationskoeffizienten von $r = 0.80$ auf (Abb. 6.3), womit 64 % der Streuung der Biegefestigkeit durch Gl. (6.2) erklärt werden können.

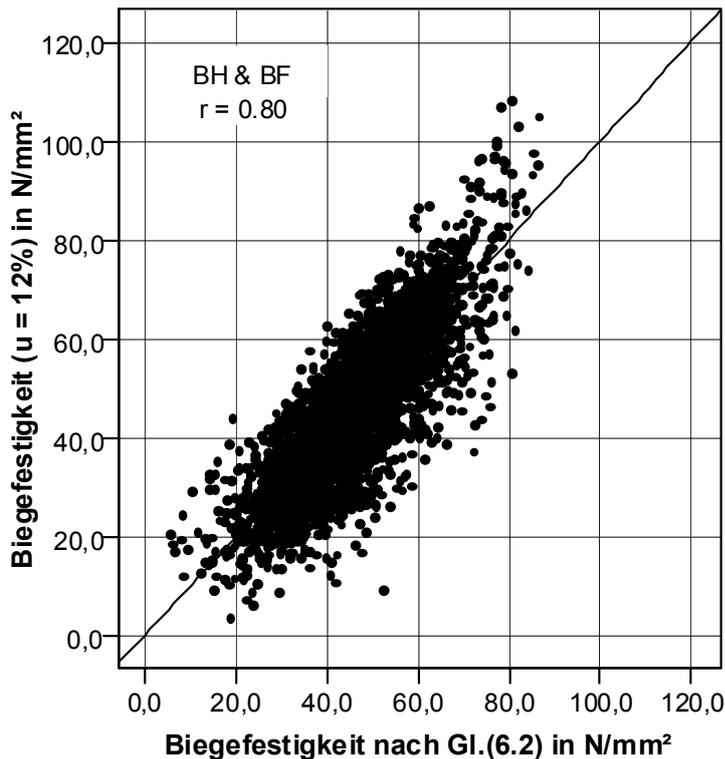


Abb. 6.3: Biegefestigkeit bei $u = 12\%$ über der Biegefestigkeit nach Gl. (6.2), $n = 3146$ PK.

Gl. (6.2) enthält einen Stützweitenexponenten von $s_0 = 0.06$. Ein Stützweitenexponent in dieser Größenordnung stimmt mit dem von ISAKSSON (1999) auf dem Niveau des 5%-Quantils bestimmten Stützweitenexponenten von $s_0 = 0.07$ bei Prüfanordnung nach EN 408 sehr gut überein. Allerdings ist der Stützweitenexponent in Gl. (6.2) höher als der Höhenexponent mit $h_0 = 0.04$. Theoretisch kann nicht hergeleitet werden, ob das Verhältnis von Stützweiten- zu Höhenexponent gleich groß oder unterschiedlich sein sollte. Eine Kontrollrechnung mit Exponenten von $s_0 = h_0 = 0.05$ zeigt identisch hohe Korrelationskoeffizienten zwischen dem Erwartungswert und der im Versuch ermittelten Biegefestigkeit. Zur Herleitung von Gl. (6.2) wurden zwar insgesamt 3146 Prüfkörper verwendet, allerdings weisen nur 171 Prüfkörper ein von 18h abweichendes Prüfverhältnis auf (Abb. 3.4).

Um zu überprüfen, wie gut Gl. (6.2) den Größeneffekt für beliebige Prüfverhältnisse beschreibt, wird Gl. (6.2) auf die verbleibenden, bei beliebigem Prüfverhältnis geprüften 493 Prüfkörper angewandt (Abb. 6.4). Gl. (6.2) erklärt 72 % der Streuung der Biegefestigkeit der 493 Prüfkörper. Ein Test auf Normalverteilung der Residuen zeigt, dass Gl. (6.2) die Zusammenhänge zwischen Holzeigenschaften, Holzabmessungen und Biegefestigkeit der 493 Prüfkörper treffend beschreibt. Gl. (6.2) kann folglich zur Beschreibung der Biegefestigkeit bei von EN 384 abweichenden Prüfverhältnissen herangezogen werden.

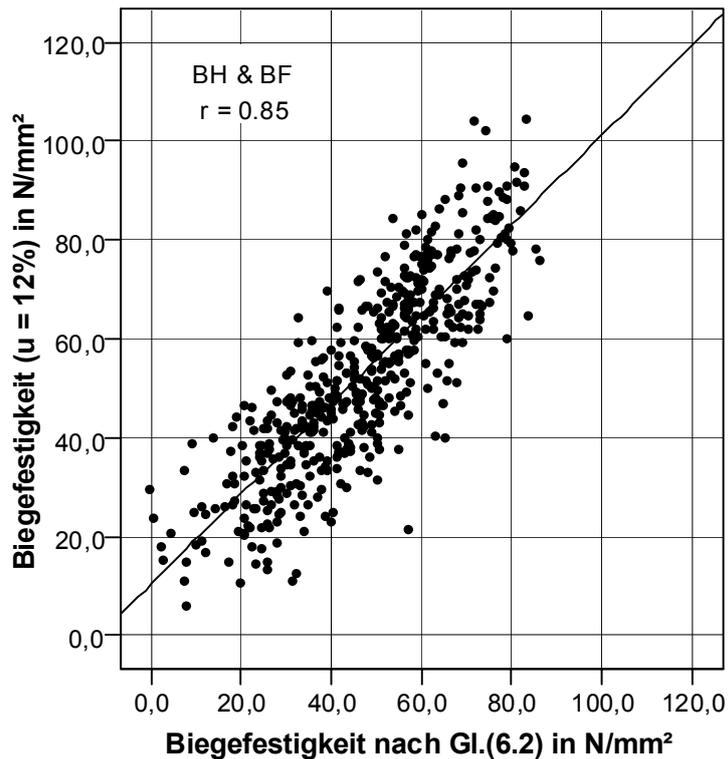


Abb. 6.4: Biegefestigkeit bei $u = 12\%$ über der Biegefestigkeit nach Gl. (6.2), $n = 493$ PK.

Zur Klärung der Frage, ob die Stützweite tatsächlich einen größeren Einfluss auf die Biegefestigkeit besitzt als die Querschnittshöhe, können die 493 Prüfkörper nicht beitragen, da eine Regressionsrechnung mit identischen Exponenten für Höhen- und Längeneffekt $s_0 = h_0 = 0.05$ anhand der 493 Prüfkörper zu gleich guten Korrelationen wie in Abb. 6.4 führt. Da ISAKSSON 1999 einen ähnlich hohen Stützweitenexponenten bei beliebigem Prüfverhältnis und Anordnung des kritischen Querschnitts innerhalb der Lasteinleitungspunkte ermittelt, wird Gl. (6.2) zur Beschreibung des Größeneffektes vorgeschlagen. Das Verhältnis der Exponenten von $h_0 / s_0 = 2 / 3$ sollte allerdings nochmals anhand von gezielt durchzuführenden Biegeversuchen überprüft werden.

Zu klären ist noch, ob Gl. (5.7) einen indirekten Einfluss der Länge auf die Biegefestigkeit enthält, der in den bisherigen Untersuchungen noch nicht berücksichtigt wurde. Kap. 5.5 zeigt, dass der indirekte Einfluss der Prüfkörperabmessungen hauptsächlich durch die Ästigkeiten t_{KAR} und m_{KAR} hervorgerufen wird. Die Ästigkeiten t_{KAR} und m_{KAR} ändern sich mit zunehmender Stütz- und damit zunehmender Kraftweite nicht wesentlich, da EN 384 die Prüfung des kritischen Querschnitts in Prüfkörperlängsrichtung vorschreibt. Durch die Anordnung des kritischen Querschnitts innerhalb der Kraftweite bleibt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines kritischen Querschnitts mit zunehmender Länge nahezu unverändert. Damit kann in diesem Fall ein indirekter Einfluss der Stützweite auf die Biegefestigkeit unberücksichtigt bleiben.

Diese Information ist beim Vergleich von Literaturdaten wichtig, da z.B. in den USA der kritische Querschnitt innerhalb der Stützweite, aber nicht notwendigerweise innerhalb der Kraftweite angeordnet

wird (BARRETT & LAM 1994), oder in Australien und Neuseeland die Prüfkörper völlig unabhängig von der Lage des kritischen Querschnitts geprüft werden (Tab. 2.3). In diesen Fällen kann die Länge einen indirekten Einfluss auf die Biegefestigkeit ausüben und damit ein größerer Längeneffekt erzeugt werden. CZMOCH ET AL. verglichen 1991 die unterschiedlichen Prüfverfahren: Durch die gezielte Prüfung des ungünstigsten Querschnitts nach EN 408 ergeben sich nach deren Ergebnissen 10 % bis 25 % geringere Biegefestigkeiten als nach US-amerikanischer Norm.

6.3 Beliebige Lage der größten Ästigkeit in Längsrichtung

Wenn der kritische Querschnitt nicht innerhalb der Kraftweite angeordnet wird, wirkt sich das vor allem auf die Ästigkeit t_{KAR} aus. Erwartet wird, dass bei zufälliger Probenahme die Ästigkeit t_{KAR} mit zunehmender Prüfkörperlänge sowohl im Mittel als auch auf dem Niveau des 95%-Quantils zunimmt. Da für alle Biegeprüfkörper innerhalb der Kraftweite alle Äste erfasst wurden, kann anhand der Prüfkörper mit großer Kraftweite abgeschätzt werden, wie sich die Ästigkeit t_{KAR} mit zunehmender Länge ändert. Für diese Auswertung werden alle Biegeprüfkörper mit einer Kraftweite $k \geq 900$ mm verwendet. Insgesamt stehen dafür 1496 Biegeprüfkörper zur Verfügung. Aufgrund der umfassenden Erfassung aller Äste können sowohl die Länge, über die die Ästigkeit berechnet wird, als auch der Querschnitt, in dem die Ästigkeit berechnet wird, gewählt werden. Die Ästigkeit t_{KAR} wird über Längen von 300 mm, 600 mm, 900 mm, 1200 mm und 1500 mm und über Querschnittshöhen von 25 %, 50 %, 75 % und 100 % der Querschnittshöhe berechnet. Dabei ergeben sich fiktive Querschnittshöhen von im Mittel 50 mm, 100 mm, 150 mm und 200 mm. Eine Aufteilung der Querschnittsbreite wird nicht vorgenommen. Abb. 6.5 zeigt den Einfluss der Länge auf die Ästigkeit t_{KAR} getrennt nach Querschnittshöhe.

Erwartungsgemäß nimmt die Ästigkeit t_{KAR} bei zufälliger Anordnung mit zunehmender Länge im Mittel zu. Die Zunahme ist, bedingt durch die Streuung der Ästigkeit, auf dem Niveau des Mittelwertes stärker ausgeprägt als auf dem Niveau des 95%-Quantils. Je kleiner der Querschnitt, desto größer ist die Ästigkeitszunahme auf dem Niveau des Mittelwertes. Die Zunahme der Ästigkeit gleicht einer Potenzfunktion.

Dies bedeutet, dass bei zufälliger Anordnung des kritischen Querschnitts in Längsrichtung mit abnehmender Prüfkörperlänge im Mittel höhere Biegefestigkeitswerte ermittelt werden als bei systematischer Anordnung des kritischen Querschnitts innerhalb der Kraftweite. Für den Größeneffekt bedeutet dies, dass bei zufälliger Anordnung des kritischen Querschnitts in Längsrichtung auch die Länge einen indirekten Einfluss auf die Biegefestigkeit ausübt. Da die Ästigkeit bei zufälliger Anordnung des kritischen Querschnitts in Längsrichtung mit zunehmender Länge zunimmt, verstärkt der indirekte Längeneffekt bei dieser Prüfmethode den direkten Längeneffekt und erhöht den wirksamen Längeneffekt. Inwiefern durch diesen indirekten Längeneffekt die anderen direkten und indirekten Größeneffekte verändert werden, kann im Rahmen dieser Arbeit nicht beantwortet werden, da keine Daten zur Auswertung zur Verfügung stehen.

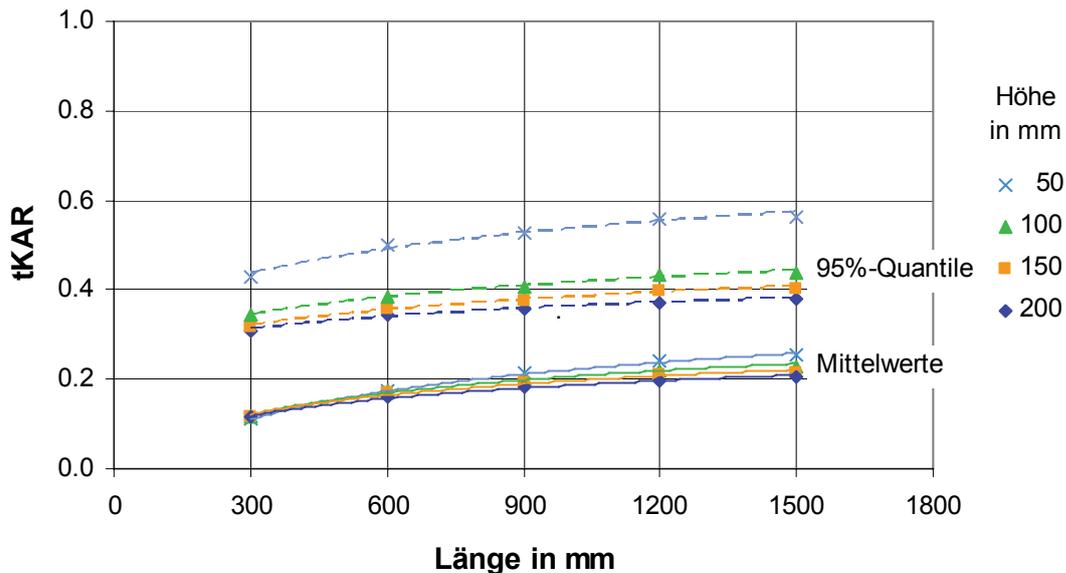


Abb. 6.5: Einfluss der Länge auf die Ästigkeit tKAR unterteilt nach Querschnittshöhe, n = 1496 PK.

6.4 Zusammenfassung zum Einfluss anderer Prüfbedingungen auf den Größeneffekt

- Die Biegefestigkeit kann bei einem Prüfverhältnis von $s/h = 18$, bei Anordnung der größten Ästigkeit tKAR innerhalb der Lastangriffspunkte und bei zufälliger Anordnung der größten Ästigkeit mKAR im Querschnitt für unsortiertes Schnittholz mit Gl. (5.12) berechnet werden:

$$E(f_{m,u=12\%}) = (29.4 + 0.0917 \cdot \rho_0 - 2.76 \cdot jrb - 21.8 \cdot tKAR - 31.6 \cdot mKAR) \cdot \left(\frac{150}{h}\right)^{0.10} \quad (5.12)$$

Durch die Anordnung der größten Ästigkeit mKAR im Querschnitt in der Biegezugzone verändert sich der Größeneffekt im Vergleich zur beliebigen Lage der größten Ästigkeit im Querschnitt nicht erkennbar.

- Die Biegefestigkeit kann bei einem nicht vorgegebenen Prüfverhältnis und bei Anordnung der größten Ästigkeit tKAR innerhalb der Lastangriffspunkte sowie bei Anordnung der größten Ästigkeit mKAR in der Biegezugzone für unsortiertes Schnittholz mit Gl. (6.2) berechnet werden:

$$E(f_{m,u=12\%}) = (29.4 + 0.0917 \cdot \rho_0 - 2.76 \cdot jrb - 21.8 \cdot tKAR - 31.6 \cdot mKAR) \cdot \left(\frac{150}{h}\right)^{0.04} \cdot \left(\frac{2700}{s}\right)^{0.06} \quad (6.2)$$

Das Verhältnis der Exponenten der Höhen- und Längeneffekte sollte nochmals überprüft werden, da die Datengrundlage sehr begrenzt war und eine Kontrollrechnung bei Gleichsetzen der Exponenten auf $s_0 = h_0 = 0.05$ keine Verschlechterung der Ergebnisse zeigte. Durch die

Anordnung der größten Ästigkeit tKAR innerhalb der Lastangriffspunkte entsteht kein indirekter Längeneffekt.

- Bei beliebiger Anordnung der größten Ästigkeit tKAR in Längsrichtung entstehen indirekte Längeneffekte. Mit zunehmender Länge nimmt die Ästigkeit zu. Durch den entstehenden indirekten Längeneffekt wird der direkte Längeneffekt verstärkt. Die Biegefestigkeit wird durch die zufällige Anordnung generell erhöht.

7. Einfluss der Sortierung auf den Größeneffekt

7.1 Allgemeines

Bisher wurde der Größeneffekt für unsortiertes Material untersucht. Durch die Sortierung verändern sich die Verteilung der Holzeigenschaften und damit der indirekte Größeneffekt. Der veränderte indirekte Größeneffekt wird auch den wirksamen Größeneffekt beeinflussen. Das in Nordamerika als Bauholz eingesetzte „dimension lumber“ wird nach der „National Grading Rule“ (NGR) sortiert. Um zu untersuchen, ob und wie sich die Art der visuellen Sortierung auf den Größeneffekt auswirken kann, wird exemplarisch ein Teilkollektiv sowohl nach DIN 4074-1 als auch nach NGR sortiert und der Einfluss auf den wirksamen Größeneffekt dargestellt.

7.2 Visuelle Sortierung nach DIN 4074-1

Bei der visuellen Sortierung nach DIN 4074-1 muss zwischen hochkant und flachkant biegebeanspruchtem Schnittholz unterschieden werden: Bretter & Bohlen, die flachkant biegebeansprucht werden, sind nach dem Sortierkriterium für Bretter & Bohlen zu sortieren. Werden Bretter & Bohlen hochkant biegebeansprucht, sind sie wie Kanthölzer nach dem Kantholz-kriterium zu sortieren. Aufgrund der unterschiedlichen Sortieranforderungen können Unterschiede im Größeneffekt hervorgerufen werden. Da Schnittholz im Bauwesen überwiegend hochkant eingesetzt wird, wird hier das Augenmerk auf die visuelle Sortierung von Kantholz gelegt. Flachkant geprüfte Bretter & Bohlen werden von der Auswertung ausgeschlossen. Die zur Verfügung stehenden, unter Standardbedingungen und hochkant geprüften 2380 Biegeprüfkörper werden entsprechend DIN 4074-1 visuell sortiert. 421 Prüfkörper werden dabei in die Sortierklasse S 7, 1199 Prüfkörper in die Sortierklasse S 10 und 648 Prüfkörper in die Sortierklasse S 13 eingestuft. 112 Prüfkörper genügen nicht den Anforderungen der Sortierklasse S 7. Mit dem Ansatz nach Gl. (5.8) werden Regressionsrechnungen getrennt für jede Sortierklasse durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tab. 7.1 zusammengestellt. Der direkte Größeneffekt nimmt mit zunehmender Holzqualität im Mittel ab. Die Höhenexponenten schwanken zwischen $g_0 = 0.13$ für die Sortierklasse S 7 und $g_0 = 0.08$ für die Sortierklasse S 13.

Tab. 7.1: Regressionsgleichungen getrennt nach visuellen Sortierklassen, n = 2268 PK.

Klasse	n	$E(f_{m,u=12\%}) =$ N/mm ²	Nr.
S 7	421	$(33.5 + 0.0646 \cdot \rho_0 - 2.29 \cdot jrb - 23.9 \cdot tKAR - 25.0 \cdot mKAR) \cdot \left(\frac{150}{h}\right)^{0.13}$	(7.1)
S 10	1199	$(29.1 + 0.0875 \cdot \rho_0 - 3.17 \cdot jrb - 17.1 \cdot tKAR - 25.8 \cdot mKAR) \cdot \left(\frac{150}{h}\right)^{0.10}$	(7.2)
S 13	648	$(18.9 + 0.114 \cdot \rho_0 - 2.79 \cdot jrb - 16.0 \cdot tKAR - 22.3 \cdot mKAR) \cdot \left(\frac{150}{h}\right)^{0.08}$	(7.3)

Anmerkung: Abkürzungen siehe Abkürzungsverzeichnis S. xvii - xviii

Abb. 7.1 bis Abb. 7.3 zeigen die wirksamen Höhenexponenten getrennt nach Sortierklassen, wobei die Quantilwerte der Biegefestigkeit für jede der fünf Höhenkategorien nach Tab. 3.1 verteilungsfrei aus den Versuchsdaten ermittelt wurden.

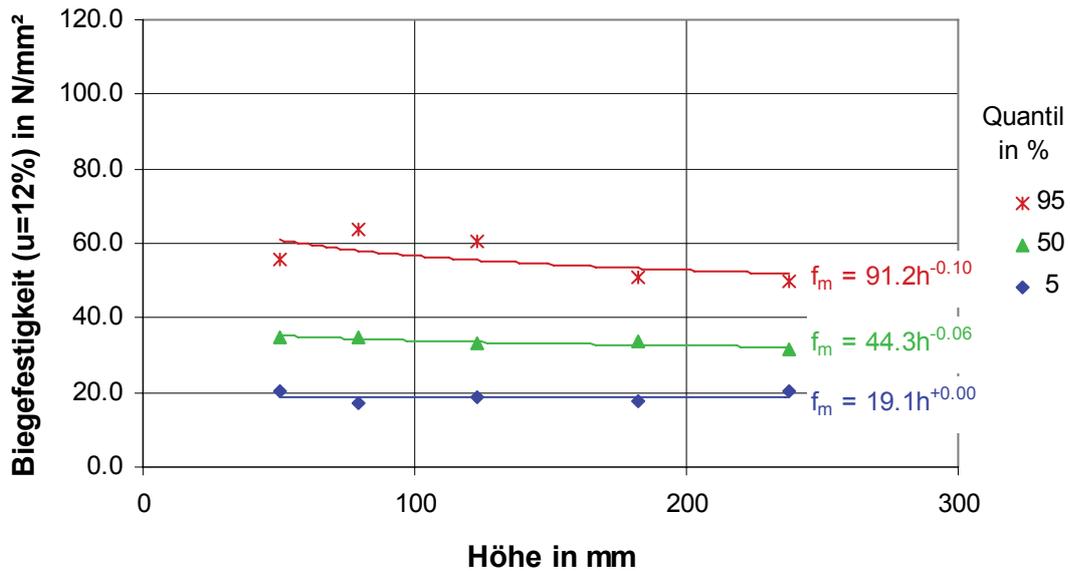


Abb. 7.1: Biegefestigkeit bei u = 12 % über der Querschnittshöhe für die Sortierklasse S 7 getrennt nach Quantil, n = 421 PK.

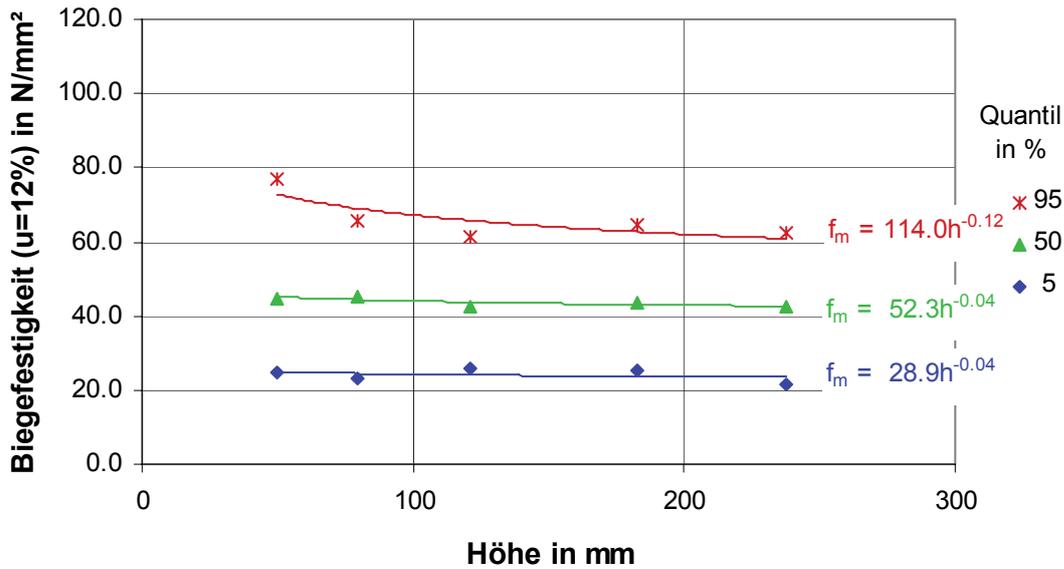


Abb. 7.2: Biegefestigkeit bei $u = 12\%$ über der Querschnittshöhe für die Sortierklasse S 10 getrennt nach Quantil, $n = 1199$ PK.

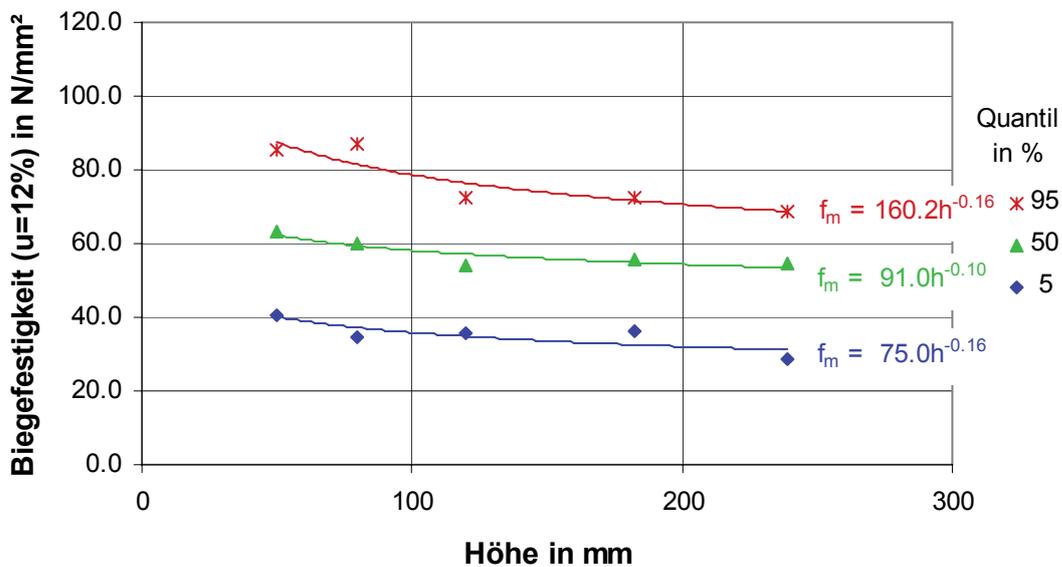


Abb. 7.3: Biegefestigkeit bei $u = 12\%$ über der Querschnittshöhe für die Sortierklasse S 13 getrennt nach Quantil, $n = 648$ PK.

Durch die visuelle Sortierung verändern sich die Größeneffekte: Auf dem Niveau des 5%-Quantils heben sich der direkte und der indirekte Größeneffekt für die Sortierklassen S 7 und S 10 auf, obwohl für diese Sortierklassen ein direkter Größeneffekt von $g_0 = 0.13$ bzw. $g_0 = 0.10$ berechnet wurde (Tab. 7.1). Der indirekte Größeneffekt führt vor allem bei den qualitativ schlechten Prüfkörpern dazu, dass der wirksame

Größeneffekt reduziert wird. In der Sortierklasse S 13 erhöht der indirekte Größeneffekt durch die Sortierung den wirksamen Größeneffekt, so dass die Exponenten in Abb. 7.3 den direkten Größeneffekt nach Tab. 7.1 überschreiten. Der von dem allgemeinen Trend abweichende starke Größeneffekt auf dem Niveau des 5%-Quantils in der Sortierklasse S 13 wird vor allem durch die hohe Festigkeit in der kleinsten Höhenkategorie bestimmt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die visuelle Sortierung nach DIN 4074-1 den Größeneffekt beeinflusst. Auf dem Niveau des 5%-Quantils ist der wirksame Größeneffekt in allen visuellen Sortierklassen nicht oder nicht stark ausgeprägt. Der wirksame Größeneffekt nimmt mit zunehmender Sortierklasse zu, wobei mit zunehmender Sortierklasse der direkte Größeneffekt ab- und der indirekte Größeneffekt zunimmt. Der indirekte Größeneffekt überlagert sich je nach Festigkeitsniveau positiv oder negativ. Bei der Sortierklasse S 13 erhöht der indirekte Größeneffekt den wirksamen Größeneffekt.

7.3 Visuelle Sortierung nach US-amerikanischer Norm (National Grading Rule)

Der größte Unterschied zwischen der US-amerikanischen und der deutschen Sortierung besteht darin, dass die US-amerikanische Sortierung die Lage des Astes im Querschnitt berücksichtigt. Liegt ein Ast im äußeren Bereich der Breitseite, gelten für diesen andere Grenzwerte als für einen Ast in Schnittholzmitte. Wie Glos & Denzler (2004 b) zeigten, kann angenommen werden, dass die US-amerikanische Sortierklasse „Select Structural“ (SS) bezüglich der charakteristischen Festigkeiten näherungsweise der deutschen Sortierklasse S 10 und die US-amerikanische Sortierklasse „No.2“ näherungsweise der deutschen Sortierklasse S 7 entsprechen.

Insgesamt werden 517 Prüfkörper nach NGR sortiert. Dabei handelt es sich um die mit einem Prüfverhältnis von $s / h = 18$ geprüften Biegeprüfkörper, deren Ästigkeit im Querschnitt zufällig angeordnet war. Die Prüfkörper werden sowohl nach DIN als auch nach NGR sortiert und die getrennt nach Sortierklasse und Querschnittshöhe über 2-parametrische WEIBULL-Verteilungen berechneten Quantile der Biegefestigkeit über der Querschnittshöhe aufgetragen. Eine Unterteilung nach Querschnittsbreite ist nicht sinnvoll, da der Großteil der Prüfkörper 38 mm breit und die Breitenstreuung damit zu gering war. Kollektive mit fünf oder weniger Prüfkörpern werden von der Auswertung ausgeschlossen. Abb. 7.4 zeigt das Ergebnis.

Aufgrund der großen Streuung der Biegefestigkeitswerte pro Querschnitt können die Ergebnisse nur Tendenzen aufzeigen. Sowohl auf dem Niveau des 50%-Quantils als auch auf dem Niveau des 5%-Quantils führt die NGR-Sortierung zu wesentlich größeren wirksamen Größeneffekten als die Sortierung nach DIN 4074-1. Bei der Sortierung nach DIN 4074-1 (Abb. 7.4, oben) fällt auf, dass die Sortierklasse S 13 bei diesem Kollektiv auf dem Niveau des 50%-Quantils einen deutlich stärkeren Größeneffekt aufweist als bei den Untersuchungen zum Einfluss der Sortierung auf den Größeneffekt (Kap. 7.2) festgestellt wurde. Auf dem Niveau des 5%-Quantils weist ebenfalls die Sortierklasse S 13 den größten wirksamen Höhenexponenten auf. Die Sortierklassen S 10 und S 7 zeigen erwartungsgemäß keinen erkennbaren Einfluss der Querschnittshöhe auf die Biegefestigkeit.

Bei der Sortierung nach NGR (Abb. 7.4, unten) weisen beide Sortierklassen unabhängig vom Festigkeitsniveau wesentlich größere Höhenexponenten auf als bei der Sortierung nach DIN 4074-1. Zu beachten ist, dass diese Auswertung mit Prüfkörpern durchgeführt wurde, deren Biegefestigkeit mit dem kritischen Querschnitt zwischen den Lastangriffspunkten ermittelt wurde. Der im US-amerikanischen System zusätzlich vorhandene Längeneffekt durch die zufällige Festlegung des Prüfbereichs wurde daher hier nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Größeneffekt auch von der Art der visuellen Sortierung beeinflusst wird.

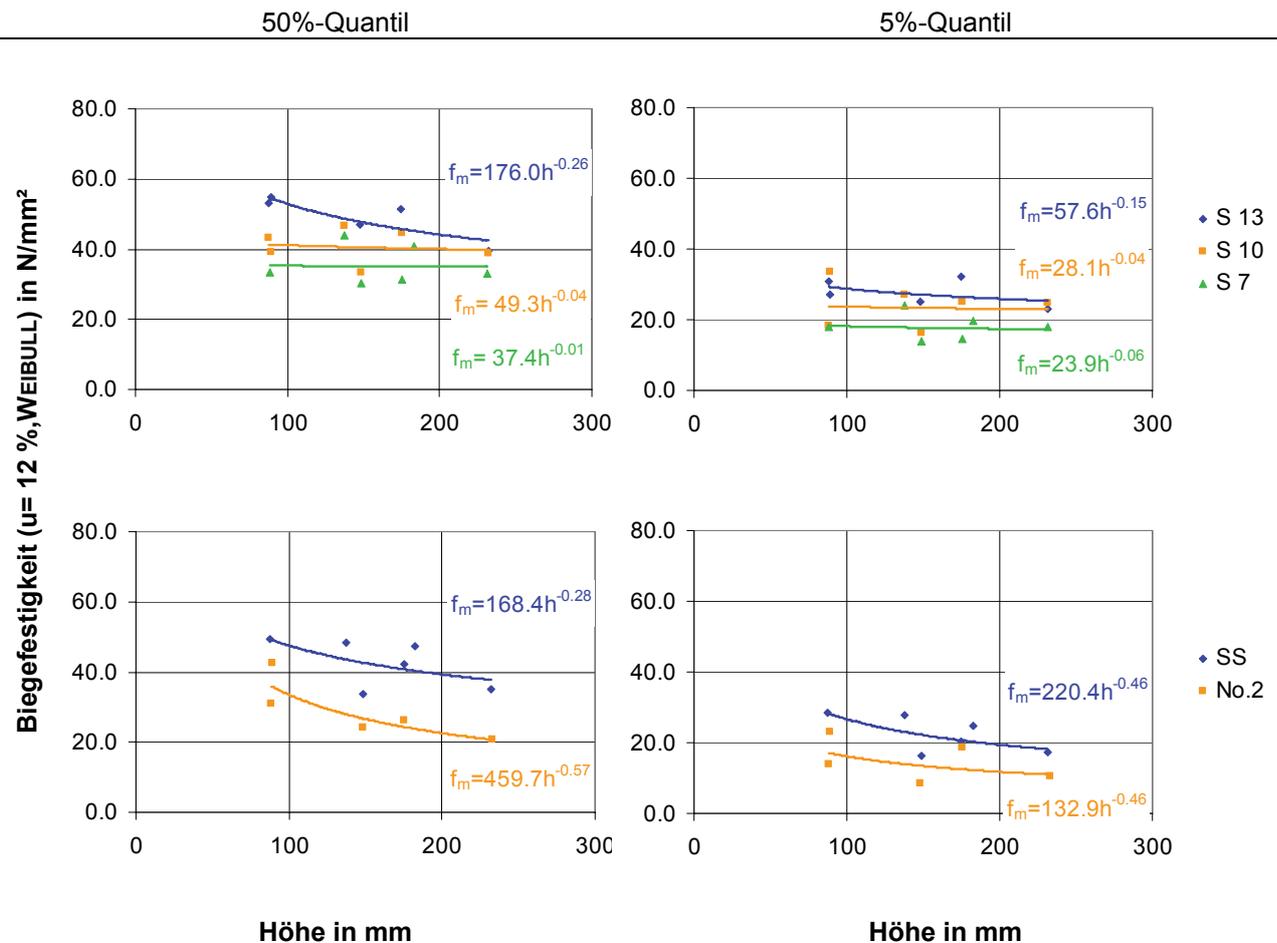


Abb. 7.4: Visuelle Sortierung nach DIN 4074-1 (oben) im Vergleich zu NGR (unten), $n = 517$ PK.

7.4 Maschinelle Sortierung

Wird Schnittholz maschinell sortiert, hängt das Ergebnis maßgeblich von den Einstellwerten der Sortiermaschine ab. In diesem Kapitel wird untersucht, ob und wie sich durch eine maschinelle Sortierung, z.B. mit Hilfe eines Röntgenscanners, der Einfluss der Querschnittshöhe auf die Biegefestigkeit verändert.

Mit einem Röntgenscanner lassen sich die größere Querschnittsabmessung, die Rohdichte sowie die Ästigkeit von Schnittholz bestimmen und diese Parameter zur Sortierung des Schnittholzes verwenden.

Die kleinere Querschnittsabmessung wird pro Querschnitt als konstant eingegeben. Mit Hilfe der im Labor erfassten Daten wird anhand der 2889 bei Standardbedingungen geprüften Schnitthölzer eine maschinelle Sortierung simuliert. Dazu wird entsprechend dem Vorgehen in der Praxis eine schrittweise Regressionsrechnung mit dem Ansatz $E(f_{m,u=12\%}) = f(b, h, \rho_0, tKAR, mKAR)$ durchgeführt und das Ergebnis als Sortierparameter (IP) zur Sortierung verwendet (Gl. (7.4)):

$$IP = 11.5 + 0.132 \cdot \rho_0 - 25.9 \cdot tKAR - 31.1 \cdot mKAR - 0.0375 \cdot h \quad (7.4)$$

Auch in Gl. (7.4) wird die Breite nicht in das Regressionsmodell aufgenommen, da die Ästigkeiten im Regressionsmodell enthalten sind. Durch die Verwendung von Labordaten erreicht die Sortierung eine hohe Genauigkeit ($r = 0.80$), da mögliche Messfehler der Sortiermaschine nicht erfasst werden. Werden für diese virtuelle Sortiermaschine Einstellwerte entsprechend DIN 4074-3 hergeleitet und die Sortierklassenkombination C 40 ($n = 189$ PK), C 30 ($n = 1221$ PK), C 24 ($n = 1009$ PK) und C 16 ($n = 421$ PK) ausgewiesen, ergeben sich die folgenden Diagramme, wenn die Ergebnisse in die fünf Höhenkategorien unterteilt ausgewertet werden. In der größten Höhenkategorie sind in der Festigkeitsklasse C 40 nur 3 Prüfkörper vorhanden. Diese werden nicht ausgewertet, da weder das 50%- noch das 5%-Quantil gesichert sind. In allen anderen Prüfkörpergruppen sind 12 oder mehr Prüfkörper enthalten. Abb. 7.5 und Abb. 7.6 zeigen die Ergebnisse auf dem 50%-Quantil- bzw. 5%-Quantilniveau.

Beide Diagramme zeigen, dass die Querschnittshöhe überwiegend keinen Einfluss auf die Biegefestigkeit besitzt. Einzige Ausnahme sind die 50%- und die 5%-Quantilwerte der Festigkeitsklasse C 40 und die 5%-Quantilwerte der Festigkeitsklasse C 30, die eine Abnahme der Biegefestigkeit mit zunehmender Querschnittshöhe zeigen. Durch die Aufnahme der Querschnittshöhe in die Sortiergleichung wird der wirksame Größeneffekt reduziert.

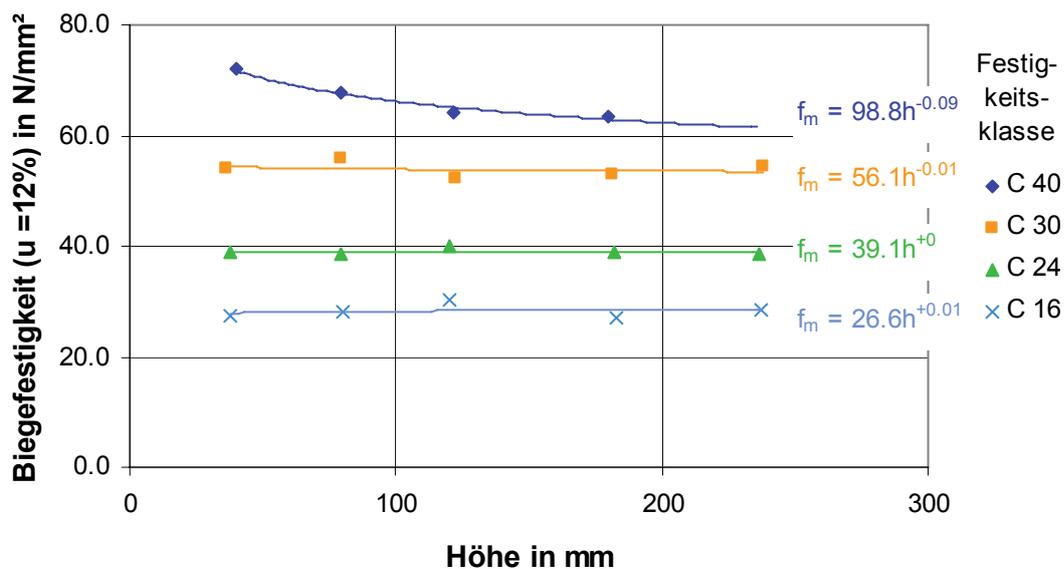


Abb. 7.5: Biegefestigkeit bei $u = 12\%$ über der Querschnittshöhe getrennt nach Festigkeitsklasse auf dem 50%-Quantilniveau, $n = 2889$ PK.

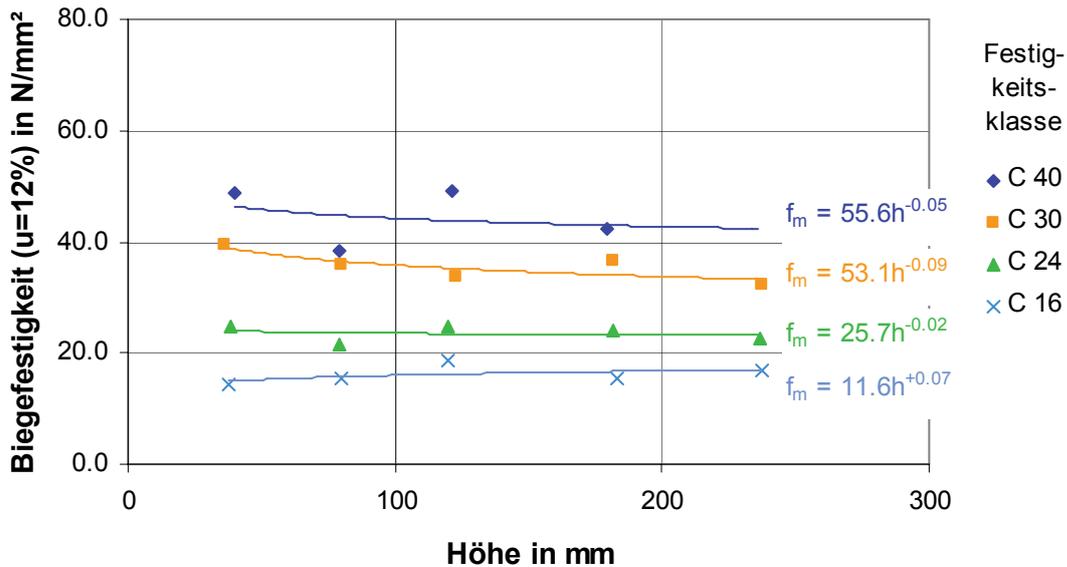


Abb. 7.6: Biegefestigkeit bei $u = 12\%$ über der Querschnittshöhe getrennt nach Festigkeitsklasse auf dem 5%-Quantilniveau, $n = 2889$ PK.

7.5 Zusammenfassung zum Einfluss der Sortierung auf den Größeneffekt

- Die Größeneffekte werden durch jede Art der Sortierung beeinflusst, weil durch die Sortierung der indirekte Größeneffekt verändert wird.
- Bei einer visuellen Sortierung nach DIN 4074-1 ist auf dem Niveau des 5%-Quantils kein wirksamer Größeneffekt erkennbar.
- Ein Vergleich zwischen visueller Sortierung nach US-amerikanischer Norm (NGR) und Sortierung nach DIN 4074-1 zeigt, dass eine visuelle Sortierung nach NGR zu deutlich größeren wirksamen Größeneffekten führt als eine visuelle Sortierung nach DIN 4074-1, selbst wenn dabei die nach US-amerikanischer Norm geltende und den Größeneffekt verstärkende Regelung, den Prüfbereich zufällig zu wählen, nicht berücksichtigt wird.
- Werden bei einer maschinellen Sortierung die Querschnittshöhe und die Ästigkeiten im Sortiermodell geeignet berücksichtigt, ist nach der Sortierung in den ausgewiesenen Festigkeitsklassen in der Regel kein wirksamer Größeneffekt mehr erkennbar.

8. Der Größeneffekt im Vergleich mit Literaturdaten

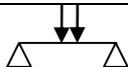
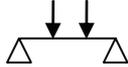
8.1 Ast- und fehlerfreie Prüfkörper

Die Ergebnisse der zahlreichen Literaturstellen zum Größeneffekt bei ast- und fehlerfreien Prüfkörpern sind in Tab. A.1 zusammengestellt. Im Folgenden werden die Größeneffekte getrennt nach dem Einfluss der Breite, der Querschnittshöhe, der Länge und dem kombinierten Einfluss aus Höhe und Länge dargestellt. Auf einen Vergleich mit den Ergebnissen von 3-Punkt-Biegeprüfungen wird verzichtet, da diese im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht untersucht wurden. Verglichen wird mit den Untersuchungen von COMBEN 1957, BOHANNAN 1966, MALHOTRA & BAZAN 1980 und MADSEN 1990 b. Der Beitrag von MADSEN muss kritisch bewertet werden, da MADSEN bei seinen Versuchen teilweise widersprüchliche Ergebnisse erzielte. Dies ist eventuell darauf zurückzuführen, dass die Prüfkörper nicht gänzlich astfrei waren, sondern nur „so wenige Äste wie möglich“ aufwiesen. Zur Beschreibung des Größeneffektes bei ast- und fehlerfreien Prüfkörpern eignet sich Gl. (6.2) (Kap. 6.2) für $t_{KAR} = m_{KAR} = 0$:

$$E(f_{m,u=12\%}) = (29.4 + 0.0917 \cdot \rho_0 - 2.76 \cdot jrb) \cdot \left(\frac{150}{h}\right)^{0.04} \cdot \left(\frac{2700}{s}\right)^{0.06} \quad (8.1)$$

Bei ast- und fehlerfreien Prüfkörpern ist der Vergleich mit den Ergebnissen von BOHANNAN (1966) sehr wichtig, da viele spätere Untersuchungen auf ihn zurückgreifen. BOHANNAN (1966) gibt an, dass die Querschnittsbreite bei ast- und fehlerfreien Prüfkörpern keinen Einfluss auf die Biegefestigkeit besitzt (Tab. 2.1). Die Querschnittsbreite beeinflusst die Biegefestigkeit nur indirekt über den Einfluss der Holzeigenschaften. Da ein Großteil des indirekten Größeneffektes über die Ästigkeiten verursacht wird, kann davon ausgegangen werden, dass die Breite die Biegefestigkeit ast- und fehlerfreier Prüfkörper nicht beeinflusst. Die Biegefestigkeitswerte von BOHANNAN (1966) wurde an Douglasienholz ermittelt und sind auf eine einheitliche Rohdichte von im Mittel $\rho = 480 \text{ kg/m}^3$ normiert. Unter der Annahme, dass Douglasie bei dieser Rohdichte im Mittel eine Jahringbreite von $jrb = 1.5 \text{ mm}$ aufweist, lassen sich die mittleren Biegefestigkeiten astfreier Prüfkörper mit Gl (8.1) berechnen und mit den von BOHANNAN angegebenen Werten vergleichen (Tab. 8.1, Abb. 8.1).

Tab. 8.1: Biegefestigkeit nach Gl. (8.1) im Vergleich zu den Biegefestigkeitswerten von BOHANNAN (1966).

Kollektiv	Anzahl	b mm	h mm	s mm	$f_{m,mean}(Boh66)$ N/mm ²	$f_{m,mean}(Gl. (8.1))$ N/mm ²	Belastungsart
D	85	132	305	4115	65.6	65.7	
F	34	25	25	533	83.4	82.0	
G	42	152	25	533	83.4	82.0	
H	43	70	15	324	85.5	86.2	
I	28	25	25	762	80.7	80.2	

Anmerkung: Abkürzungen siehe Abkürzungsverzeichnis S. xvii - xviii

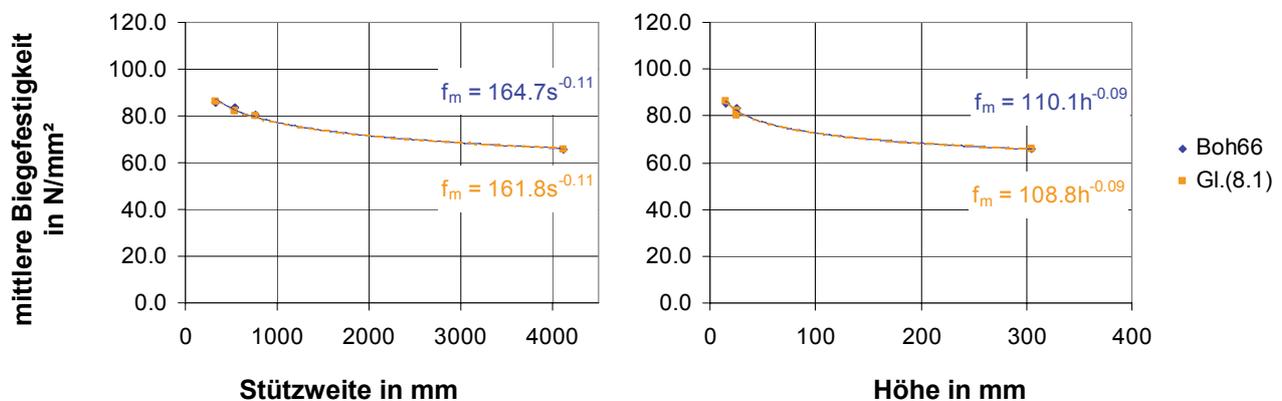


Abb. 8.1: Biegefestigkeit nach Gl. (8.1) im Vergleich zu den Biegefestigkeitswerten von BOHANNAN (1966).

Die mit Gl. (8.1) bestimmten Biegefestigkeitswerte weichen von den im Versuch ermittelten Biegefestigkeiten um bis zu 1.5 N/mm² ab. Die Veränderungen der Biegefestigkeit durch Änderungen der Holzabmessungen werden von Gl. (8.1) sehr gut abgebildet, obwohl Gl. (8.1) für Fichte hergeleitet wurde und hier auf Douglasie angewandt wird.

Weitere Versuche zum Einfluss von Querschnittshöhe und Länge auf die Biegefestigkeit sind in Tab. 8.2 zusammengefasst. Abb. 8.2 zeigt graphisch den Einfluss der Querschnittshöhe auf die mit 4-Punkt-Prüfung ermittelte Biegefestigkeit fehlerfreier Douglasie und vergleicht die Ergebnisse mit den nach Gl. (8.1) ermittelten Biegefestigkeiten, unter der Annahme, dass Douglasie im Mittel eine Rohdichte von $\rho = 480 \text{ kg/m}^3$ bei einer Jahrringbreite von $jrb = 1.5 \text{ mm}$ aufweist. Die Biegefestigkeitswerte von COMBEN (1957) können mit Gl. (8.1) sehr gut abgebildet werden. Die Biegefestigkeitswerte von MALHOTRA & BAZAN (1980) weichen vor allem bei der kleinen Querschnittshöhe vom Erwartungswert nach Gl. (8.1) ab. Allerdings testeten MALHOTRA & BAZAN (1980) nur 9 Prüfkörper. Bei den Untersuchungen von MADSEN fällt auf, dass sich für die beiden untersuchten Kollektive stark unterschiedliche Steigungen bei gleicher Veränderung der Querschnittsgröße ergeben (Abb. 8.2), was nicht nachvollziehbar ist. Diese Zusammenhänge können mit Gl. (8.1) nicht abgebildet werden. Die widersprüchlichen Ergebnisse

können eventuell durch die Auswahl der Prüfkörper erklärt werden: Diese wurden so ausgewählt, dass sie „so wenige Äste wie möglich“ aufwiesen. Es wird angenommen, dass die Prüfkörper nicht astfrei waren und es deshalb zu Widersprüchen kommt.

Tab. 8.2: Biegefestigkeit nach Gl. (8.1) im Vergleich zu den Biegefestigkeitswerten von COMBEN (1957), MALHOTRA & BAZAN (1980) und MADSEN (1990 b).

Autor	Holzart	Anzahl	b mm	h mm	s mm	k mm	$f_{m,mean}$ N/mm ²	$f_{m,mean}(Gl.(8.1))$ -
Com57	Douglasie	9	20	5	80	27	91.6	98.0
		9	20	10	160	53	90.1	91.5
		9	20	20	320	107	84.0	85.3
		9	20	40	640	213	77.7	79.6
		9	20	60	960	320	75.4	76.5
		9	20	80	1280	427	70.6	74.3
Mal80	Douglasie	9	38	42	686	229	86.2	79.1
		8	38	140	2286	762	70.4	70.2
Mad90b	Douglasie	50	25	25	360	120	83.5	84.0
		50	50	50	360	120	65.4	81.7
		50	25	25	720	240	75.7	80.6
		50	50	50	720	240	69.6	78.4

Anmerkung: Abkürzungen siehe Abkürzungsverzeichnis S. xvii – xviii

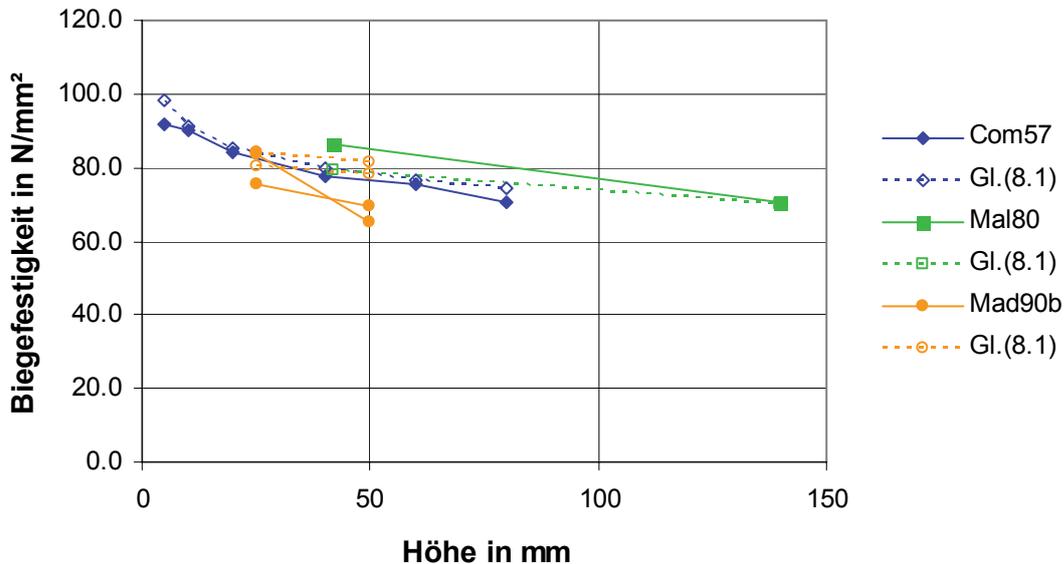


Abb. 8.2: Biegefestigkeit nach Gl. (8.1) im Vergleich zu den Biegefestigkeitswerten von COMBEN (1957), MALHOTRA & BAZAN (1980) und MADSEN (1990 b).

In Tab. A.2 werden die in der Literatur vorhandenen Größeneffektoren verglichen. Alle Literaturstellen beziehen die Abnahme der Biegefestigkeit mit zunehmendem Volumen für ast- und fehlerfreie Prüfkörper auf einen reinen Höheneffekt, so dass Längeneffekte nicht verglichen werden können. Um einen Höhenfaktor als Kombination aus Höhen- und Längenfaktor zu erhalten, müssen in Gl. (8.1) die Exponenten addiert werden. Der Exponent von $g_0 = 0.10$ liegt leicht unter dem 1966 von BOHANNAN ermittelten Wert von $g_0 = 0.11$ und deutlich unterhalb des von MADSEN (1990 b) angegebenen Wertes von $g_0 = 0.25$ für Biegefestigkeitswerte bei $u = 12\%$ auf dem Niveau des Mittelwertes.

8.2 Asthaltige Prüfkörper

Die Ergebnisse der zahlreichen Literaturstellen zum Größeneffekt bei Schnittholz sind in Tab. A.5 zusammengestellt. Nachfolgend werden die Größeneffekte getrennt nach dem Einfluss der Breite, der Querschnittshöhe, der Länge und dem kombinierten Einfluss aus Höhe und Länge dargestellt. Zusätzliche Einflüsse, wie die Auswirkung von unterschiedlichen Sortierregeln und unterschiedlichen Prüfverfahren, werden dabei diskutiert. Für die Biegefestigkeit von Schnittholz bei einer Prüfverfahren nach EN 384 eignet sich Gl. (6.2) (Kap. 6.2):

$$E(f_{m,u=12\%}) = (29.4 + 0.0917 \cdot \rho_0 - 2.76 \cdot jrb - 21.8 \cdot tKAR - 31.6 \cdot mKAR) \cdot \left(\frac{150}{h}\right)^{0.04} \cdot \left(\frac{2700}{s}\right)^{0.06} \quad (8.2)$$

Der Einfluss der Querschnittsbreite auf die Biegefestigkeit wird in der Literatur unter Hinweis auf BOHANNAN's Arbeit (1966) oft vernachlässigt. Da bisher in der Literatur keine Breitenfaktoren angegeben werden, ist in Tab. A.5 dafür keine getrennte Spalte ausgewiesen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde gezeigt, dass die Querschnittsbreite zwar keinen direkten Einfluss auf die Biegefestigkeit besitzt, diese aber indirekt über die materialspezifischen Einflüsse der Holzeigenschaften beeinflusst. Bei Schnittholz nimmt die Biegefestigkeit im Mittel mit zunehmender Breite zu. Dieses Ergebnis finden auch HANHIJÄRVI ET AL. (2007), die aufgrund einer Auswertung an unterschiedlichen Fichtenschnittholzquerschnitten im Mittel einen Breitenexponenten von $b_0 = 0.17$ angeben, der leicht über dem in Abb. 5.28 dargestellten Breitenexponenten von $b_0 = 0.11$ auf dem Niveau des Mittelwertes liegt. Die Zunahme ist bei qualitativ schlechtem Schnittholz am stärksten. Bei genauer Betrachtung einzelner Literaturstellen fällt auf, dass z.B. die Autoren MADSEN & STINSON (1982) oder MARCHAND & FUX (1983) eine Zunahme der Biegefestigkeit mit zunehmender Breite feststellten (Kap. 2.5). Abb. 8.3 zeigt die charakteristischen Biegefestigkeitswerte der Sortierklasse No.1 von MADSEN & STINSON (1982) auf dem Niveau des 5%-Quantils, wobei die Auswahl des zu prüfenden Bereichs sowohl in Längsrichtung als auch in Bezug auf die Zugseite zufällig erfolgte und die eingezeichneten Werte bei jeweils gleicher Querschnittshöhe ermittelt wurden. Die Ergebnisse von MARCHAND & FUX (1983) wurden in Längsrichtung mit systematischer Astlage und der größten Ästigkeit im Biegezugbereich ermittelt, wobei gleichzeitig mit der Querschnittsbreite auch die Querschnittshöhe erhöht wurde.

Die Vielzahl der zur richtigen Einschätzung nötigen Angaben zeigt, dass ein Vergleich des Größeneffektes mit Literaturdaten schwierig ist. Bedingt durch andere Zusammenhänge von Holzeigenschaften und Holzabmessungen, durch andere Prüfverfahren oder durch andere Holzfeuchten können unterschiedliche Größeneffekte hervorgerufen werden. Im Falle der in Abb. 8.3 dargestellten Versuchsergebnisse stimmt der Breiteneffekt auf dem Niveau des 5%-Quantils sehr gut mit dem in Abb. 5.28 für unsortiertes Material dargestellten Breiteneffekt überein.

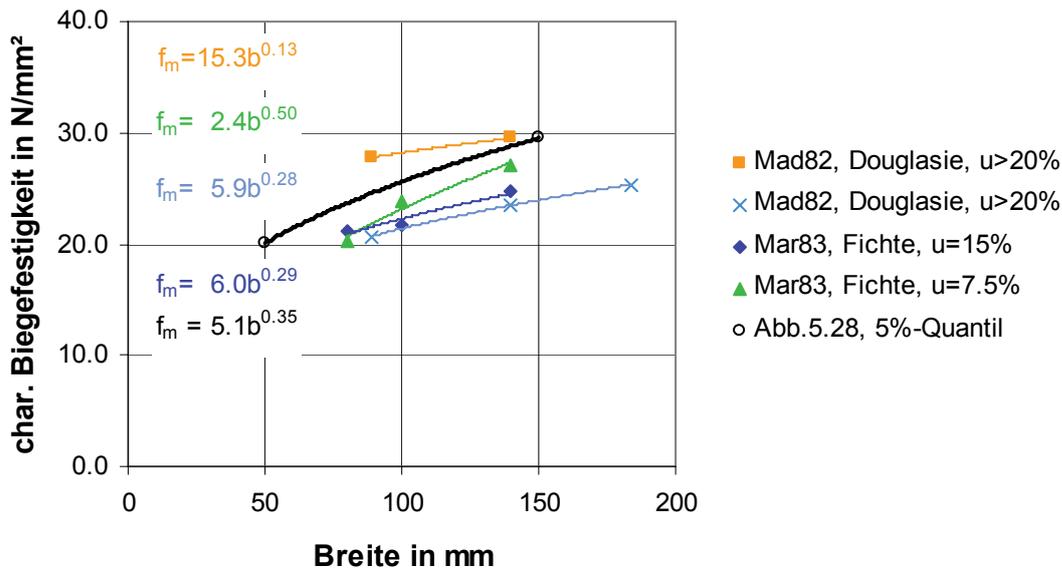


Abb. 8.3: Charakteristische Biegefestigkeitswerte von MADSEN & STINSON (1982) und MARCHAND & FUX (1983) im Vergleich zum Breiteneffekt nach Abb. 5.28.

Die Untersuchungen zum Einfluss der Querschnittshöhe auf die Biegefestigkeit sind zahlreich (Tab. A.5). Abb. 8.4 zeigt graphisch die Höhenfaktoren, die mit Hilfe der in der Literatur angegebenen Höhenexponenten aus Tab. A.5 berechnet wurden: Auffällig ist die breite Streuung der Höhenfaktoren vor allem für kleine Querschnittshöhen. In der Literatur werden sowohl Höhenexponenten auf dem Niveau des Mittelwertes als auch auf dem Niveau des 5%-Quantils angegeben. MADSEN & NIELSEN (1978 a), BURY (1981) und ROUGER ET AL. (1993) geben darüber hinaus unterschiedliche Höhenexponenten für unterschiedliche Sortierklassen an. In der Literatur werden für den Mittelwert und den 5%-Quantilwert entweder gleiche Höhenexponenten angegeben (BARRETT & GRIFFIN 1989, BARRETT & FEWELL 1990) oder der Höhenexponent des Mittelwertes überschreitet den des 5%-Quantils (MADSEN 1990 a).

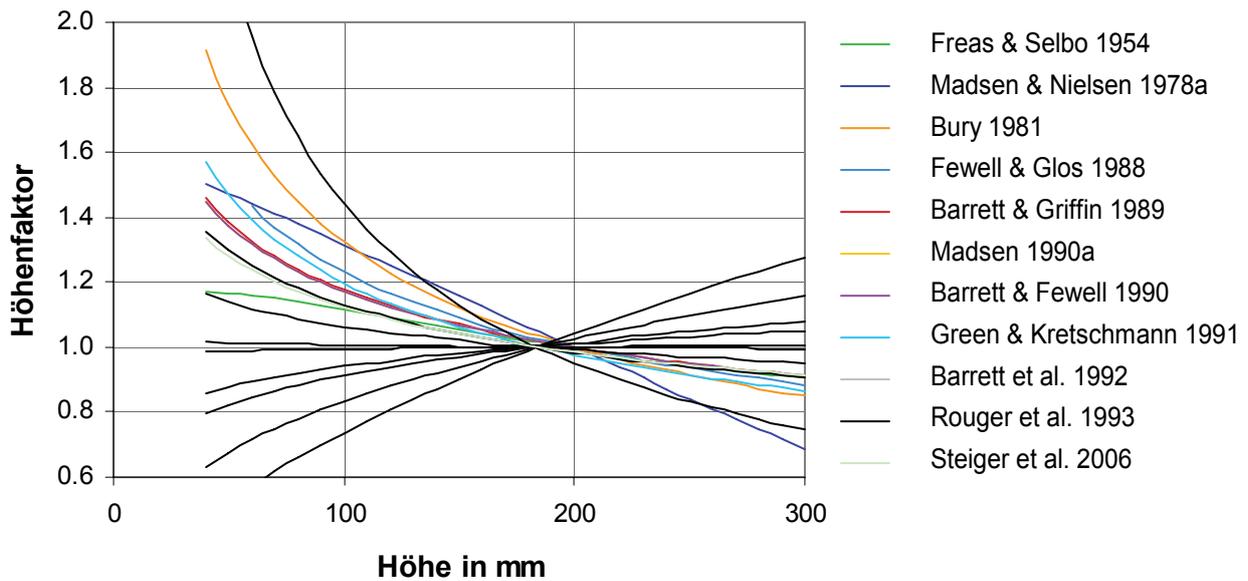


Abb. 8.4: Höhenfaktoren berechnet aufgrund der in Tab. A.5 angegebenen Höhenexponenten getrennt nach Literaturstelle (Bezugshöhe $h = 200$ mm gewählt, falls unbekannt).

Aufgrund der hier durchgeführten Untersuchung hängt es von der Art der Sortierung und der Prüfanordnung ab, ob sich die Höhenexponenten auf unterschiedlichen Festigkeitsniveaus verändern. Durch eine geeignete Sortierung kann der Einfluss der Holzabmessungen innerhalb einer Sortierklasse unberücksichtigt bleiben. Bei unsortiertem Material und einer Prüfanordnung entsprechend EN 384 nimmt die Biegefestigkeit auf dem Niveau des 5%-Quantils mit zunehmender Querschnittshöhe leicht zu, während sie auf dem Niveau des Mittelwertes nahezu unverändert bleibt (Abb. 5.32).

Ob sich unterschiedliche Höhenexponenten für unterschiedliche Sortierklassen ergeben, ist wiederum von der Art der Sortierung abhängig. In Kap. 7.3 wurde gezeigt, dass eine visuelle Sortierung nach US-amerikanischen Sortierregeln (NGR) zu deutlich größeren Höhenexponenten führt als eine visuelle Sortierung nach DIN 4074-1. Dies erklärt auch die meist größeren Höhenexponenten US-amerikanischer Studien im Vergleich zu europäischen Studien. Darüber hinaus kann der Höheneffekt, unabhängig von der angewandten Prüfanordnung, für unterschiedliche Holzarten unterschiedliche Größenordnungen annehmen, da die Zusammenhänge Holzeigenschaften - Holzabmessungen - Biegefestigkeit holzart-spezifisch sind.

Der Einfluss der Länge auf die Biegefestigkeit konnte im Rahmen dieser Arbeit nur eingeschränkt untersucht werden. Der Längenexponent wird stark durch die Prüfanordnung beeinflusst. Wird der zu prüfende Bereich zufällig ausgewählt, nimmt mit zunehmender Länge des Prüfkörpers die Ästigkeit zu und die Biegefestigkeit ab. Dieser indirekte Längeneffekt kann bei der Anordnung des kritischen Querschnitts innerhalb der Lastangriffspunkte nicht beobachtet werden (Kap. 6.3). Wenn Querschnittshöhe und Stützweite Vielfache voneinander sind, kann nicht zwischen einem Einfluss der Querschnittshöhe und einem Einfluss der Stützweite unterschieden werden.

Da auch bei den in der Literatur durchgeführten Untersuchungen Querschnittshöhe und Länge oftmals Vielfache voneinander sind, geben viele Autoren kombinierte Exponenten an. Falls getrennte Exponenten für Querschnittshöhe und Länge angegeben werden, können diese für einen kombinierten Exponenten in guter Näherung addiert werden. Auch hier gilt dasselbe wie für die Querschnittshöhe: Die Exponenten sind stark von der Prüfanordnung und der Art der Sortierung abhängig. Da im US-amerikanischen Raum durch die Sortierung schon bei systematischer Anordnung des kritischen Querschnitts im mittleren Drittel der Prüflänge größere Exponenten erzeugt werden als bei einer Sortierung nach DIN 4074-1 und durch die zufällige Auswahl des Prüfbereichs der Effekt noch verstärkt wird, stehen die deutlich größeren Exponenten in US-amerikanischen Studien nicht im Widerspruch zu den Ergebnissen dieser Arbeit.

8.3 Zusammenfassung zum Größeneffekt im Vergleich mit Literaturdaten

Bei einem Vergleich der in der Literatur verfügbaren Größeneffekte mit den im Rahmen dieser Arbeit hergeleiteten Größeneffekten sind zahlreiche Einflüsse, die sich auf den Größeneffekt auswirken können, zu berücksichtigen. Folgende Angaben müssen beim Vergleich von Literaturdaten beachtet werden:

- Der Größeneffekt ist von der Prüfanordnung abhängig: In USA & Kanada wird die Biegefestigkeit in der Regel ermittelt, ohne einen kritischen Querschnitt zu identifizieren, d.h. der kritische Querschnitt wird zufällig innerhalb der Stützweite angeordnet. In Kap. 6.3 wurde gezeigt, dass dadurch der indirekte Längeneffekt vergrößert wird. Durch die in Europa vorgeschriebene Anordnung des kritischen Querschnitts innerhalb der Lastangriffspunkte wird der Längeneffekt reduziert. Dass durch die Anordnung des kritischen Querschnitts innerhalb der Lastangriffspunkte der Längeneffekt bei Biegung gänzlich unterdrückt wird (MADSEN 1991), kann aufgrund der hier verfügbaren Daten nicht bestätigt werden.
- Der Größeneffekt ist von der Art der Sortierung abhängig: Die visuelle Sortierung nach US-amerikanischen Sortierregeln (NGR) führt zu einer deutlichen Erhöhung des wirksamen Größeneffektes im Vergleich zur visuellen Sortierung nach DIN 4074-1 (Kap. 7.3). Bei der maschinellen Sortierung ist nach der Sortierung in den ausgewiesenen Festigkeitsklassen in der Regel kein wirksamer Größeneffekt mehr erkennbar, insbesondere wenn die Querschnitts-abmessung im Sortiermodell geeignet berücksichtigt wird (Kap. 7.4).
- Der Größeneffekt kann wegen möglicher spezifischer Zusammenhänge zwischen den Holzabmessungen, den Holzeigenschaften und der Biegefestigkeit von der Holzart beeinflusst werden.

In USA & Kanada werden aufgrund dieser Gegebenheiten für visuell sortiertes Schnittholz deutlich stärkere Größeneffekte ermittelt als im europäischen Raum. Der indirekte Größeneffekt der Querschnitts-abmessungen wirkt im europäischen Raum dem direkten Größeneffekt merklich entgegen, was zu einer deutlichen Verringerung des wirksamen Größeneffektes führt.

9. Diskussion

9.1 Allgemeines

Der Größeneffekt lässt sich in einen Einfluss der Querschnittsbreite, einen Einfluss der Querschnittshöhe und einen Einfluss der Stützweite auf die Biegefestigkeit gliedern. Alle drei Holzabmessungen wirken sich auf die Biegefestigkeit unterschiedlich stark aus.

Der gesamte Größeneffekt unterliegt komplexen Zusammenhängen: Der wirksame Größeneffekt setzt sich aus einem direkten und einem indirekten Größeneffekt zusammen. Der direkte Größeneffekt kann mit Hilfe der WEIBULL-Theorie beschrieben werden. Der indirekte Größeneffekt basiert auf Wechselwirkungen zwischen den Holzabmessungen und den Holzeigenschaften und deren Einfluss auf die Biegefestigkeit. Eine wesentliche Rolle spielt dabei die Veränderung der Ästigkeit mit sich verändernden Holzabmessungen. Da z.B. mit zunehmender Querschnittsabmessung die Ästigkeit abnimmt, führt der indirekte Größeneffekt zu einer mit zunehmender Querschnittsabmessung zunehmenden Biegefestigkeit. Der direkte Einfluss der Holzabmessungen auf die Biegefestigkeit wird dadurch reduziert. Die direkten und indirekten Größeneffekte können in der Praxis nicht voneinander getrennt werden. Darüber hinaus beeinflussen auch die Prüfbedingungen den Größeneffekt.

In der Literatur wird der wirksame Größeneffekt bisher meist mit Hilfe der WEIBULL-Theorie beschrieben. Für ast- und fehlerfreie Kleinproben erfasst dieses Vorgehen relativ gut die tatsächlich vorhandenen Verhältnisse. Bei fehlerfreien Prüfkörpern gibt es in der Regel keine Wechselwirkungen zwischen den Holzabmessungen und den Holzeigenschaften und damit keinen indirekten Einfluss auf die Biegefestigkeit, da keine Äste und andere festigkeitsmindernden Holzmerkmale im Prüfkörper vorhanden sind. Deshalb stimmen die direkten Anteile der im Rahmen dieser Arbeit hergeleiteten Gleichungen sehr gut mit den mit Hilfe der WEIBULL-Theorie berechneten Größeneffekten überein. Die Exponenten unterscheiden sich nur unwesentlich. Auf Grundlage von fehlerfreiem Material wurde von BOHANNAN (1966) gezeigt, dass die Breite keinen Einfluss auf die Biegefestigkeit besitzt. Dies kann bestätigt werden, da die Breite in dem praktisch vorkommenden Bereich keinen direkten Einfluss auf die Biegefestigkeit ausübt (Kap. 5.3). Mit zunehmender Breite wird allerdings die Ästigkeit reduziert, weshalb sich die Biegefestigkeit von Schnittholz mit zunehmender Breite erhöht. Mit Hilfe dieses indirekten Breiteneffektes kann erklärt werden, weshalb mehrere Autoren eine mit zunehmender Breite zunehmende Biegefestigkeit

feststellten (Kap. 8.2). Bei fehlerfreien Prüfkörpern tritt dieser Effekt aufgrund der fehlenden Ästigkeit jedoch nicht auf.

Querschnittshöhe und Stützweite beeinflussen auch die Biegefestigkeit von fehlerfreiem Material: Mit zunehmender Querschnittshöhe und Stützweite nimmt die Biegefestigkeit ab. Da Querschnittshöhe und Stützweite aufgrund der Prüfvorschrift meist Vielfache voneinander sind, wird für ein definiertes Prüfverhältnis häufig ein kombinierter Größeneffekt angegeben, der meist auf die Querschnittshöhe bezogen wird.

Während die mit Hilfe der WEIBULL-Theorie berechneten Ergebnisse bei fehlerfreien Proben sehr gut mit den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen übereinstimmen (Kap. 8.1), ist die alleinige Anwendung der WEIBULL-Theorie zur Beschreibung der Größeneffekte bei Schnittholz aufgrund der indirekten Größeneffekte jedoch kritisch zu bewerten. Die im Rahmen dieser Arbeit berechneten wirksamen Größeneffekte unterschreiten die mit Hilfe der WEIBULL-Theorie berechneten wirksamen Größeneffekte deutlich. Dafür gibt es mehrere Ursachen, die im Folgenden erläutert werden:

- In früheren Untersuchungen an Schnittholz wurde dem Einfluss der Prüfbedingungen und dem indirekten Größeneffekt wenig Beachtung geschenkt.
- Durch die Kopplung Holzabmessung - Ästigkeit - Biegefestigkeit können die Sortierregeln den Größeneffekt beeinflussen.
- Hinzu kommt, dass große Datenmengen zur Auswertung des Größeneffektes zur Verfügung stehen müssen, um zufällige Ergebnisse zu vermeiden.

Bei der Bewertung von Größeneffekten spielen die Prüfbedingungen eine wesentliche Rolle. Entscheidend ist dabei die Lage und Anordnung des kritischen Querschnitts. Wird vor der Biegeprüfung ein kritischer Querschnitt identifiziert und innerhalb der Kraftweite platziert, werden indirekte Längeneffekte weitgehend unterdrückt. Da EN 384 dieses Vorgehen zur Ermittlung der Biegefestigkeit vorschreibt, wird bei Anwendung dieser Prüfnorm der indirekte Längeneffekt reduziert. Bei zufälliger Lage des kritischen Querschnitts in Prüfkörperlängsrichtung nimmt die Ästigkeit mit zunehmender Stützweite tendenziell zu (Kap. 6.3), wodurch ein indirekter Längeneffekt entsteht, der den direkten Längeneffekt verstärkt. Deshalb werden z.B. bei der Anwendung der US-amerikanischen Prüfnorm, die eine zufällige Anordnung des kritischen Querschnitts in Prüfkörperlängsrichtung fordert, unabhängig von der zur Auswertung verwendeten Theorie größere Längeneffekte ermittelt als in Europa. Da im Rahmen dieser Arbeit keine Informationen über den indirekten Längeneffekt bei zufälliger Anordnung des kritischen Querschnitts in Prüfkörperlängsrichtung vorlagen, konnte die genaue Größe des indirekten Längeneffektes nicht geklärt werden. Die durchgeführten Berechnungen zeigen lediglich Tendenzen auf und sollten durch weitere Versuchsserien untermauert werden.

Im Gegensatz zum indirekten Einfluss der Länge bewirken die indirekten Größeneffekte von Querschnittsbreite und Querschnittshöhe eine Zunahme der Biegefestigkeit mit zunehmender Querschnittsabmessung und wirken somit dem direkten Größeneffekt von Querschnittsbreite und Querschnittshöhe

entgegen. Wie bei der Querschnittsbreite zeigt sich der indirekte Einfluss der Querschnittshöhe vor allem auf dem Niveau des 5%-Quantils der Biegefestigkeit und verliert sich auf dem Niveau des 95%-Quantils der Biegefestigkeit, da für hochwertiges Schnittholz die Ästigkeit so gering ist, dass sich Querschnittsänderungen nicht mehr wesentlich auf die Ästigkeit auswirken. Die indirekten Einflüsse von Querschnittshöhe und Querschnittsbreite werden durch die Anordnung des kritischen Querschnitts innerhalb der Lastangriffspunkte noch verstärkt, da tendenziell größere Äste als bei zufälliger Anordnung des kritischen Querschnitts innerhalb der Prüfkörperlänge festigkeitsentscheidend sind.

Wie bereits in der Literatur erwähnt, können die Einflüsse von Stützweite und Querschnittshöhe auf die Biegefestigkeit wegen der begrenzten verfügbaren Versuchsdaten nur schwer voneinander getrennt werden. Üblicherweise liegt das Prüfverhältnis von Stützweite zu Querschnittshöhe zwischen $s/h = 15$ und $s/h = 21$. Ändert sich die Querschnittshöhe der Prüfkörper, wird in der Regel auch deren Stützweite entsprechend verändert. Mit Hilfe solcher Daten kann nur ein kombinierter Größeneffekt aus Querschnittshöhe und Stützweite ermittelt werden, wobei als Bezugsgröße entweder die Stützweite oder die Querschnittshöhe gewählt werden kann. Der kombinierte direkte Einfluss von Querschnittshöhe und Stützweite auf die nach EN 384 ermittelte Biegefestigkeit ergibt einen Exponenten $g_0 = 0.10$. Durch den indirekten Einfluss der Querschnittsabmessungen auf die Biegefestigkeit wird der Größeneffekt mit zunehmender Ästigkeit reduziert, so dass auf dem Niveau des 50%-Quantils für unsortiertes Material kein ausgeprägter Einfluss der Querschnittshöhe vorliegt. Dies gilt nur, wenn der kritische Querschnitt innerhalb der Lastangriffspunkte angeordnet wird und deshalb kein indirekter, den direkten Längeneffekt verstärkender Größeneffekt entsteht. Die meisten der in der Literatur angegebenen Größeneffekte überschreiten diesen Exponenten von $g_0 = 0.10$ deutlich. Zum einen sind die Werte oft für sortiertes Material angegeben und nicht mit den Werten für unsortiertes Material vergleichbar, da die Sortierung den Größeneffekt beeinflusst. Zum anderen wurden die meisten Untersuchungen zum Größeneffekt im US-amerikanischen Raum durchgeführt, wo durch die vom europäischen Raum abweichende Prüfanordnung und die hauptsächlichliche Verwendung von 38 mm breiten Querschnitten veränderte Größeneffekte entstehen.

Die Schnittholzsortierung wirkt sich auf den Größeneffekt aus, da durch die Sortierung der indirekte Größeneffekt beeinflusst wird. Bei einer visuellen Sortierung nach DIN 4074-1 kann auf dem Niveau des 5%-Quantils für die Sortierklassen S 7 und S 10 kein wirksamer Größeneffekt nachgewiesen werden. Bei einer Sortierung nach NGR und Anwendung der WEIBULL-Theorie zur Beschreibung des Größeneffektes ergeben sich wesentlich höhere Exponenten als bei einer Sortierung nach DIN 4074. Dies zeigt, dass die Sortierung den Größeneffekt beeinflusst und dass die in dieser Arbeit enthaltenen geringen Größeneffekte nicht im Widerspruch zu den in der Literatur angegebenen Größeneffekten auf Grundlage der WEIBULL-Theorie stehen.

Bei der maschinellen Sortierung entscheidet die Art der Sortierung über deren Auswirkung auf den Größeneffekt. Werden die Querschnittshöhe und die Ästigkeiten im Sortiermodell berücksichtigt, ist ein Größeneffekt zur Anpassung der Biegefestigkeit auf eine einheitliche Querschnittsgröße in der Regel nicht mehr erforderlich.

Die in der Einleitung gestellten Fragen können somit wie folgt beantwortet werden:

- Gibt es einen direkten Einfluss der Holzabmessungen auf die Biegefestigkeit?
Ja, es gibt einen direkten Einfluss der Querschnittshöhe auf die Biegefestigkeit, der von einem indirekten Einfluss der Holzabmessungen auf die Biegefestigkeit überlagert wird. Die Querschnittsbreite besitzt keinen direkten Einfluss auf die Biegefestigkeit. Durch die Anordnung des kritischen Querschnitts zwischen den Lasteinleitungspunkten hat die Stützweite ebenfalls keinen direkten Einfluss auf die Biegefestigkeit.
- Wird der Größeneffekt durch materialspezifische und geometrische Einflüsse überlagert?
Ja, der Größeneffekt wird durch materialspezifische und geometrische Einflüsse überlagert. Mit zunehmender Querschnittshöhe und Querschnittsbreite nimmt vor allem die Ästigkeit ab. Dies führt zu einer Zunahme der Biegefestigkeit mit zunehmender Querschnittsgröße. Dieser Effekt wirkt dem direkten Größeneffekt entgegen.
- Welchen Einfluss besitzen die Holzabmessungen insgesamt auf die Biegefestigkeit?
Für unsortiertes Material ist der Einfluss von Querschnittsbreite und Querschnittshöhe auf die nach EN 384 ermittelte Biegefestigkeit wegen der gegenläufigen direkten und indirekten Effekte insgesamt gering. Der Einfluss verändert sich je nach Festigkeitsniveau: Auf dem Niveau des 5%-Quantils nimmt die Biegefestigkeit mit zunehmender Querschnittsbreite zu, während sie auf dem Niveau des 95%-Quantils leicht abnimmt. Die Zunahme der Biegefestigkeit mit zunehmender Querschnittsbreite besitzt für die Praxis eher untergeordnete Bedeutung, da die Breite in relativ engen Grenzen variiert. Mit zunehmender Querschnittshöhe nimmt die Biegefestigkeit auf dem Niveau des 5%-Quantils leicht zu, während sie auf dem Niveau des 95%-Quantils abnimmt. Im Mittel beeinflusst die Querschnittshöhe die Biegefestigkeit nur unwesentlich. Auf dem Niveau des 95%-Quantils entspricht der wirksame Höheneffekt dem direkten Höheneffekt, da auf diesem Niveau der Einfluss der Äste sehr klein ist. Werden die direkten Einflüsse von Querschnittshöhe und Stützweite getrennt voneinander betrachtet, kann der direkte Einfluss der Stützweite auf die nach EN 384 ermittelte Biegefestigkeit mit einem Exponenten von $s_0 = 0.06$ angegeben werden und ist damit gering. Durch die Anordnung des kritischen Querschnitts innerhalb der Lastangriffspunkte entsteht kein indirekter Längeneffekt, so dass der angegebene direkte Längeneffekt dem wirksamen Längeneffekt entspricht.
- Ist der Größeneffekt abhängig von der Schnittholzqualität?
Ja, der Größeneffekt ist abhängig von der Schnittholzqualität, da sich der indirekte Größeneffekt je nach Schnittholzqualität verändert.
- Können die in der Literatur vorhandenen und sich zum Teil widersprechenden Angaben zum Größeneffekt erklärt werden?
Ja, die in der Literatur vorhandenen Angaben können aufgrund unterschiedlicher Prüfbedingungen, unterschiedlicher Sortiervorschriften und unterschiedlicher Auswerteverfahren auf Grundlage dieser Arbeit weitgehend erklärt werden.

9.2 Empfehlungen für die Normung

Die europäische Prüfnorm EN 384 schreibt vor, dass zur Ermittlung der Biegefestigkeit der kritische Querschnitt innerhalb der Lastangriffspunkte angeordnet wird und dass die Biegefestigkeit auf eine Querschnittshöhe von $h = 150$ mm und auf eine Stützweite von $s = 18 \cdot h = 2700$ mm mit Belastung in den Drittelpunkten umgerechnet werden muss. Sind Stützweite und Querschnittshöhe Vielfache voneinander, kann ein kombinierter Größeneffekt für den Einfluss von Stützweite und Querschnittshöhe angegeben und entweder auf die Stützweite oder auf die Querschnittshöhe bezogen werden. Hierbei ist der Bezug auf die Stützweite einem Bezug auf die Querschnittshöhe vorzuziehen, da ein Höheneffekt im Rahmen der Bemessung zu einem iterativen Bemessungskonzept führt.

Bei der Bemessung ist die charakteristische Festigkeit, also das 5%-Quantil entscheidend. Auf diesem Niveau erscheint die Berücksichtigung eines Größeneffektes, der zu einer Verringerung der Biegefestigkeit mit zunehmender Holzabmessung führt, auf Grundlage der hier vorliegenden Ergebnisse nicht angemessen. Im Rahmen dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass für unsortiertes Material das 5%-Quantil der Biegefestigkeit mit der Querschnittshöhe tendenziell zunimmt. Der geringe direkte Höheneffekt mit $h_0 = 0.04$ wird auf dem Niveau des 5%-Quantils durch den indirekten Größeneffekt reduziert, so dass der wirksame Größeneffekt vernachlässigbar gering wird. Gleiches gilt für den Größeneffekt bei visuell sortiertem Material. Nur in der Sortierklasse S 13 liegt ein Einfluss der Querschnittshöhe auf die Biegefestigkeit vor, der zu einer geringfügigen Abnahme der Biegefestigkeit mit zunehmender Querschnittshöhe auch auf dem 5%-Quantilniveau führt. Unter Beachtung der großen Streuungen der Versuchsdaten kann dieser Effekt jedoch vernachlässigt werden. Bei maschinell festigkeitssortiertem Schnittholz kann die Querschnittshöhe berücksichtigt werden, so dass auch in diesem Fall auf die Berücksichtigung eines Höheneffektes in der Bemessungsnorm verzichtet werden kann.

Der Einfluss der Querschnittsbreite auf die Biegefestigkeit ist auf dem Niveau des 5%-Quantils ausgeprägter und ergibt eine Zunahme der Biegefestigkeit mit zunehmender Querschnittsbreite. Dieser Effekt sollte allerdings nicht in der Bemessungsnorm berücksichtigt werden, da der Einfluss stark qualitätsabhängig ist und generell zu auf der sicheren Seite liegenden Ergebnissen führt. Darüber hinaus variiert die Querschnittsbreite nur in sehr engen Grenzen, was ebenfalls dafür spricht, den Effekt nicht in die Bemessungsnormen aufzunehmen.

Zusammenfassend lassen sich aufgrund dieser Arbeit folgende Empfehlungen für die Normung festhalten:

- Im Rahmen der DIN 1052 sollte auch weiterhin auf einen Einfluss der Querschnittshöhe auf die charakteristische Biegefestigkeit verzichtet werden.
- In EN 384 sollte auf eine Umrechnung der Biegefestigkeitswerte auf $h = 150$ mm sowohl auf dem Niveau des 5%-Quantils als auch auf dem Niveau des Mittelwertes verzichtet werden, solange der kritische Querschnitt innerhalb der Lastangriffspunkte angeordnet wird und das Prüfverhältnis $s / h = 18$ mit Belastung in den Drittelpunkten beträgt.

- In EN 384 sollte für Prüfverhältnisse, die von $s / h = 18$ abweichen, ein Längeneffekt verankert werden. Der Exponent kann mit $s_0 = 0.06$ festgelegt werden. Da die Prüfkörperanzahl zur Untersuchung des direkten Längeneffektes im Rahmen dieser Arbeit begrenzt war, sollte die Bestätigung dieses Längeneffektes im Rahmen weiterer Untersuchungen gezielt geprüft werden.

10. Zusammenfassung

Über den Einfluss der Holzabmessungen auf die Festigkeit von biegebeanspruchtem Schnittholz liegen in der Literatur stark variierende, sich teilweise widersprechende Ergebnisse vor. In der Regel wird davon ausgegangen, dass die Biegefestigkeit des Holzes mit zunehmenden Holzabmessungen, insbesondere zunehmender Höhe, abnimmt. Es liegen aber auch Veröffentlichungen über Versuchsergebnisse vor, bei denen mit zunehmenden Holzabmessungen ein Ansteigen der Biegefestigkeit festgestellt wurde. Üblicherweise wird der Größeneffekt in Anlehnung an die WEIBULL-Theorie mit einer Exponentialfunktion beschrieben, wobei die ermittelten Exponenten zwischen 0.5 und -0.5 streuen.

Ziel dieser Arbeit war es, den Größeneffekt bei biegebeanspruchtem Fichtenschnittholz zu erfassen und so zu modellieren, dass mit diesem Modell die große Streuung der bisher vorliegenden Versuchsergebnisse erklärt werden kann. Als Hypothese wird dabei unterstellt, dass sich der empirisch feststellbare „wirksame“ Größeneffekt bei biegebeanspruchtem Schnittholz aus zwei Teileffekten, nämlich einem „direkt“ und einem „indirekt“ wirkenden Anteil zusammensetzt. Dieser Ansatz ist in Abb. 10.1 dargestellt: Einerseits wirken sich die Holzabmessungen im Sinne der WEIBULL-Theorie unabhängig von der Schnittholzqualität „direkt“ auf die Biegefestigkeit aus (mit zunehmender Holzabmessung nimmt die Biegefestigkeit ab), andererseits wirken sich die Holzabmessungen auch auf die Ausprägung der Holzeigenschaften im Schnittholz aus (beispielsweise nimmt die Ästigkeit mit zunehmender Querschnittsgröße ab). Über diesen Zusammenhang wirken sich die Holzabmessungen damit zusätzlich „indirekt“ auf die Biegefestigkeit aus. Diese beiden direkten und indirekten Teileffekte können je nach gewählter Prüfanordnung und Holzqualität entweder in gleicher Richtung wirken und damit den tatsächlich auftretenden Größeneffekt verstärken, z.B. wenn mit zunehmender Prüfkörperlänge die Ästigkeit zunimmt, oder sie wirken gegenläufig, z.B. wenn mit zunehmender Prüfkörperhöhe und -breite die Ästigkeit abnimmt, und reduzieren dann den wirksamen, tatsächlichen auftretenden Größeneffekt.

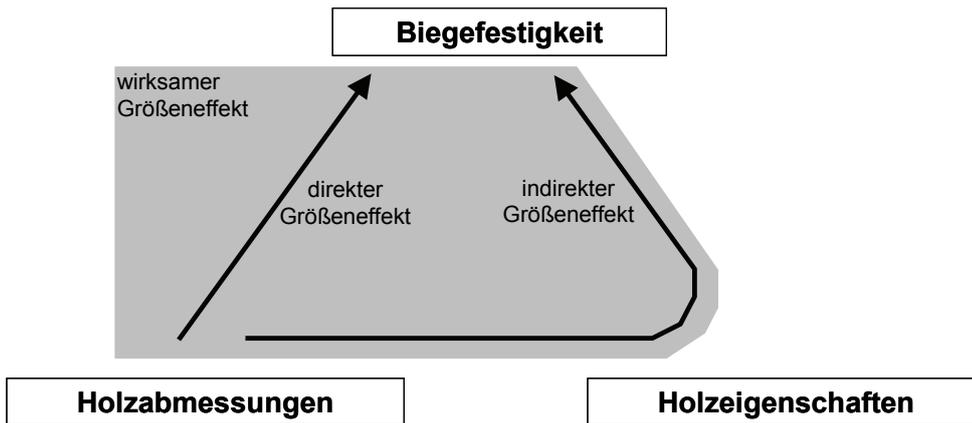


Abb. 10.1: Aufteilung des Größeneffektes in Teileffekte.

Um diesen, in der Literatur bisher nicht diskutierten Zusammenhang zu untersuchen, wurden die Holzabmessungen, die Holzeigenschaften und die Biegefestigkeit von 4156 Prüfkörpern aus vorliegenden und selbst durchgeführten Untersuchungen zusammengestellt und ausgewertet. Zur Untersuchung des von der Art der Beanspruchung unabhängigen Zusammenhangs zwischen den Holzabmessungen und den Holzeigenschaften wurden zusätzlich 2345 Zugprüfkörper herangezogen, so dass für diesen Teil der Auswertung 6501 Prüfkörper zur Verfügung standen.

Die Prüfkörperabmessungen variierten in der Breite von 21 mm bis 120 mm, in der Höhe von 24 mm bis 254 mm und in der Stützweite von 360 mm bis 4500 mm, wobei jedoch entsprechend der europäischen Prüfnorm 3492 der 4156 Biegeproben ein konstantes Verhältnis von Stützweite s zu Höhe h von $s/h = 18$ hatten. Dementsprechend wurde der Größeneffekt zunächst bei folgenden Standardbedingungen untersucht:

- Prüfverhältnis $s/h = 18$,
- Lage der größten Ästigkeit im mittleren Drittel der Prüflänge und dort auf der Biegezugseite,
- Holzfeuchte $u = 12\%$.

Folgende Holzeigenschaften wurden erfasst und in die Untersuchung einbezogen: Darr-Rohdichte ρ_0 , Jahrringbreite jrb , Ästigkeit (Parameter $tKAR$ und $mKAR$), Druckholzanteil dh , Markabstand m , Jahrringlage jrl . Als Modellansatz zur Beschreibung der Biegefestigkeit wurde ein Ansatz der Form

$$E(f_{m,u=12\%}) = f(\rho_0, jrb, tKAR, mKAR, dh, m, jrl) \cdot \left(\frac{75}{b}\right)^{b_0} \cdot \left(\frac{150}{h}\right)^{h_0} \cdot \left(\frac{2700}{s}\right)^{s_0}$$

gewählt, wobei der erste Term den indirekten Größeneffekt beinhaltet und die restlichen drei Terme in Anlehnung an WEIBULL den direkten Größeneffekt in Abhängigkeit der Querschnittsabmessungen b und h sowie der Stützweite s beschreiben. Für Standardbedingungen kann dieser Ansatz wie folgt gelöst werden:

$$E(f_{m,u=12\%}) = (29.4 + 0.0917 \cdot \rho_0 - 2.76 \cdot jrb - 21.8 \cdot tKAR - 31.6 \cdot mKAR) \cdot \left(\frac{150}{h}\right)^{0.04} \cdot \left(\frac{2700}{s}\right)^{0.06}$$

Die Parameter Druckholzanteil dh , Markabstand m und Jahrringlage jrl besitzen keinen zusätzlichen Einfluss auf die Biegefestigkeit, der nicht bereits über die in die Gleichung aufgenommenen Holzeigenschaften abgedeckt wird.

Die Untersuchung erbrachte folgende Ergebnisse:

- Die Querschnittsbreite beeinflusst die Biegefestigkeit nur indirekt über die Holzeigenschaften. Die Querschnittshöhe beeinflusst die Biegefestigkeit sowohl direkt als auch indirekt. Direkte und indirekte Anteile besitzen dabei unterschiedliche Tendenzen. Sowohl die Breite als auch die Höhe bewirken über ihre indirekten Anteile eine Biegefestigkeitszunahme mit zunehmender Querschnittsabmessung, die je nach Holzqualität unterschiedlich groß ist. Dabei spielt die Holzeigenschaft Ästigkeit eine entscheidende Rolle. Da die Ästigkeit mit zunehmender Querschnittsgröße abnimmt, nimmt die Biegefestigkeit mit zunehmender Querschnittsgröße zu. Dieser Effekt verliert sich mit zunehmender Schnittholzqualität, weshalb der indirekte Größeneffekt mit zunehmender Schnittholzqualität geringer und damit der wirksame Größeneffekt größer wird.
- Die direkten Höhen- und Längeneffekte sind unabhängig von der Schnittholzqualität und folgen der WEIBULL-Theorie: Mit zunehmender Querschnittshöhe und Länge nimmt beim direkten Größeneffekt die Biegefestigkeit ab. Bei Prüfanzordnung nach EN 408 und EN 384 ergibt sich ein direkter kombinierter Höhen- und Längeneffekt mit einem Exponenten von $g_0 = 0.10$. Auf Grundlage der geringen Anzahl der verfügbaren Daten, die mit einem von $s/h = 18$ abweichenden Prüfverhältnis geprüft wurden, lässt sich der Exponent g_0 in einen Höhenexponenten $h_0 = 0.04$ und einen Längensexponenten $s_0 = 0.06$ aufteilen.
- Neben den Prüfbedingungen beeinflusst die Sortierung den wirksamen Größeneffekt maßgeblich. Da durch eine Sortierung der Zusammenhang zwischen Holzeigenschaften und Querschnittsabmessungen verändert wird, ändern sich mit der Sortierung der indirekte und damit auch der wirksame Größeneffekt. Bei einer maschinellen Sortierung nach DIN 4074-1 ist auf dem Niveau des 5%-Quantils kein wirksamer Größeneffekt nachweisbar. Bei einer maschinellen Sortierung können die Ästigkeit und die Querschnittshöhe im Sortiermodell berücksichtigt werden. Ist dies der Fall, kann über die Ästigkeit der indirekte und über die Querschnittshöhe der direkte Größeneffekt abgedeckt werden. Nach der Sortierung ist dann in den Festigkeitsklassen in der Regel kein wirksamer Größeneffekt erkennbar.
- Wird der kritische Querschnitt wie z.B. in Nordamerika oder in Australien und Neuseeland abweichend von den europäischen Prüfvorschriften zufällig in Schnittholzlängsrichtung angeordnet, übt die Länge über die Holzeigenschaften auch einen indirekten Einfluss auf die Biegefestigkeit aus. Die Effekte verstärken sich in ihrer Wirkung und der Längeneffekt nimmt zu,

wenn der Prüfbereich zufällig, also unabhängig von der Lage des kritischen Querschnitts in Schnittholzlängsrichtung festgelegt wird.

Mit diesem prüfbedingten Längeneinfluss und dem Einfluss der spezifischen Sortierung können die in der US-amerikanischen und australischen bzw. neuseeländischen Literatur angegebenen großen Größeneffekte erklärt werden.

Auf der Basis der nach europäischen Prüfvorschriften hergeleiteten charakteristischen Festigkeitswerte erscheint unter Berücksichtigung der hier festgestellten indirekten Größeneffekte die Einführung eines Größenfaktors für Schnittholz nicht gerechtfertigt.

11. Literatur

AASHEIM, E.; SOLLI, K.H. (1995):

Size factor of Norwegian glued laminated beams. Proc. of CIB-W18 Meeting, Paper 28-12-2. Copenhagen, Denmark. 8.

AICHER, S.; REINHARDT, H.W. (1993):

Einfluß der Bauteilgröße in der linearen und nichtlinearen (Holz-) Bruchmechanik. Holz Roh- Werkst. 51: 215-220.

AICHER, S.; REINHARDT, H.W.; KLÖCK W. (1993):

Nichtlineares Bruchmechanik-Maßstabsgesetz für Fichte bei Zugbeanspruchung senkrecht zur Faserrichtung. Holz Roh- Werkst. 51: 385-394.

AICHER, S.; DILL-LANGER, G.; KLÖCK, W. (2002):

Evaluation of different size effect models for tension perpendicular to grain design. Proc. of CIB-W18 Meeting, Paper 35-6-1. Kyoto, Japan. 10.

BARRETT, J.D. (1974):

Effect of size on tension perpendicular-to-grain strength of Douglas-fir. Wood Fiber Sci. 6(2): 126-143.

BARRETT, J.D.; FOSCHI, R.O. (1978):

On the application of brittle fracture theory, fracture mechanics and creep-rupture models for the prediction of the reliability of wood structural elements. West. For. Prod. Lab. Vancouver, Canada. 74.

BARRETT, J.D.; GRIFFIN, H. (1989):

Size effects and property relationships for Canadian 2-inch dimension lumber. Proc. of CIB-W18A Meeting, Paper 22-6-1. Berlin, Germany. 47.

BARRETT, J.D.; FEWELL, A.R. (1990):

Size factors for the bending and tension strength of structural timber. Proc. of CIB-W18A Meeting, Paper 23-10-3. Lisbon, Portugal. 24.

BARRETT, J.D.; LAM, F.; LAU, W. (1992):

Size effects in visually graded softwood structural lumber. Proc. of CIB-W18 Meeting, Paper 25-6-5. Åhus, Sweden. 45.

BARRETT, J.D.; LAM, F. (1994):

Factors affecting the strength of structural timber. Proc. of Pacific Timber Eng. Conf. Gold Coast, Australia. 69-77.

BAŽANT, Z.P.; XI, Y.; REID, S.G. (1991):

Statistical size effect in quasi-brittle structures: I. Is Weibull theory applicable? J. Eng. Mech. 117(11): 2609-2622.

- BECHTEL, F.K. (1988):
A model to account for length effect in the tensile strength of lumber. Proc. of Int. Conf. on Timber Eng. Seattle, USA. 355-362.
- BOATRIGHT, S.W.J.; GARRETT, G.G. (1983):
The effect of microstructure and stress state on the fracture behaviour of wood. J. Mater. Sci. 18: 2181-2199.
- BOHANNAN, B. (1966):
Effect of size on bending strength of wood members. USDA, For. Prod. Lab., Res. Pap. 56. Wisconsin, USA. 29.
- BOSTRÖM, L. (1990):
Application of fracture mechanics to timber structures. State of the art report, Part 2. Proc. of IUFRO S5.02 Timber Eng. Conf. St. John, Canada. 170-207.
- BUCHANAN, A.H. (1983):
Effect of member size on bending and tension strength of wood. Proc. of IUFRO S5.02 Wood Eng. Meeting. Madison, USA. 133-149.
- BUCHANAN, A.H. (1986):
Combined bending and axial loading in lumber. J. Struct. Eng. 112(12): 2592-2609.
- BURY, K.V. (1979):
Statistical analysis of NLGA tension tests. University of British Columbia. Vancouver, Canada. 18.
- BURY, K.V. (1981):
Statistical analysis of NLGA bending tests. University of British Columbia. Vancouver, Canada.
- BURGER, N. (1998):
Einfluss der Holzabmessungen auf die Festigkeit von Schnittholz unter Zugbeanspruchung in Faserrichtung. Dissertation, TU München. Shaker-Verlag, Aachen, Germany. 229.
- CLINE, M.; HEIM, A.L. (1912):
Test of structural timber. USDA, For. Serv. Bulletin. 123.
- COMBEN, A.J. (1957):
The effect of depth on the strength properties of timber beams with an analysis of the stresses and strains developed. Dept. Scientific and Industrial Research, For. Prod. Res. Special Report No. 12. 32.
- CRAMER, S.M.; McDONALD, K.A. (1989):
Predicting lumber tensile stiffness and strength with local grain angle measurements and failure analysis. Wood Fiber Sci. 21(4): 393-410.
- CURRY, W.T.; TORY, J.R. (1976):
The relation between the modulus of rupture (ultimate bending stress) and modulus of elasticity of timber. BRE, CP 30/76. Princes Risborough Laboratory, England. 19.
- CURRY, W.T.; FEWELL, A.R. (1981):
Grade stress values for timber. Paper presented at ad hoc meeting on standardization of stress grading and finger-jointing of coniferous sawn timber. Geneva, Switzerland. 42.
- CZMOCH, I.; THELANDERSSON, S.; LARSEN, H.J. (1991):
Effect of within member variability on bending strength of structural timber. Proc. of CIB-W18 Meeting, Paper 24-6-3. Oxford, England. 25.

- DAVID, H.A.; HARTLEY, H.O.; PEARSON, E.S. (1954):
The distribution of the ratiom in a single sample, of range to standard deviation. *Biometrika* 41(1954): 482-493.
- DAWLEY & YOUNGQUIST (1947). Unbekannt (zitiert BOHANNAN 1966).
- EHLBECK, J.; COLLING, F. (1987):
Die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den Eigenschaften der Brettlamellen. *Bauen mit Holz* 87(10): 646-655.
- EHLBECK, J.; COLLING, F. (1990):
Bending strength of glulam beams. A design proposal. Proc. of CIB-W18A Meeting, Paper 23-12-1. Lisbon, Portugal. 8.
- FEWELL, A.R. (1983):
Size factors for timber bending and tension stresses. Proc. of CIB-W18 Meeting, Paper 16-6-1. Lillehammer, Norway. 20.
- FEWELL, A.R.; CURRY, W.T. (1983):
Depth factor adjustments in the determination of characteristic bending stresses for visually stress-graded timber. *Struct. Eng.* 61B(2): 35-40.
- FEWELL, A.R.; GLOS, P. (1988):
The determination of characteristic strength values for stress grades of structural timber. Part 1. Proc. of CIB-W18A Meeting, Paper 21-6-2. Parksville, Vancouver Island, Canada. 20.
- FREAS, A.D.; SELBO, M.L. (1954):
Fabrication and design of glued laminated wood structural members. United States Department of Agriculture Technical Bulletin no. 1069.
- FRONIUS, K. (1982):
Der Rundholzplatz. Arbeiten und Anlagen im Sägewerk. Band 1. DRW-Verlag Stuttgart, Germany. 264.
- GALLIGAN, W.L.; SHELLEY, B.E.; PELLERIN, R.F. (1993):
The influence of testing and size variables on the tensile strength of machine stress-rated lumber. *For. Prod. J.* 43(4): 70-74.
- GLOS, P. (1981):
Zur Modellierung des Festigkeitsverhaltens von Bauholz bei Druck-, Zug- und Biegebeanspruchung. Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke, Heft 61, SFB 96, TUM. München, Germany. 54.
- GLOS, P.; HENRICI, D. (1993):
Einfluß der Querschnittshöhe auf die Biegefestigkeit von Fichtenschnittholz mit kleinen Querschnitten. Bericht Nr. 91508, Institut für Holzforschung, Ludwig-Maximilians-Universität. München, Germany. 45.
- GLOS, P.; RICHTER, C. (2002):
Sortierhilfen und Erläuterungen zur Anwendung der DIN 4074 in der Praxis. Bericht Nr. 02502, Holzforschung München, Technische Universität München. München, Germany. 88.
- GLOS, P.; DENZLER, J.K. (2004 a):
Effect of Test Piece Orientation on Characteristic Bending Strength of Structural Timber. Proc. of CIB-W18 Meeting, Paper 37-6-2. Edinburgh, Scotland. 8.
- GLOS, P.; DENZLER, J.K. (2004 b):
Begleitende Untersuchungen zum US-Zertifizierungsverfahren für Schnittholz der Holzart Tanne deutscher Herkunft. Bericht Nr. 03509, Holzforschung München, Technische Universität München. München, Germany. 23.

- GRAF, O. (1938):
Tragfähigkeit der Bauhölzer und der Holzverbindungen. Grundlagen für die Beurteilung der Hölzer nach Güteklassen. Zulässige Beanspruchungen. Mitteilungen des Fachausschusses für Holzfragen, Heft 20 : 1-47.
- GRAF, O.; EGNER, K. (1938):
Über die Veränderlichkeit der Zugfestigkeit von Fichtenholz mit der Form und Größe der Einspannköpfe der Normkörper und mit Zunahme des Querschnitts der Probekörper. Holz Roh- Werkst. 1(10): 384-388.
- GREEN, D.W.; KRETSCHMANN, D.E. (1991):
Lumber property relationships for engineering design standards. Wood Fiber Sci. 23(3): 436-456.
- HANHIJÄRVI, A. RANTA-MAUNUS, A., SARKAMA, H.; POUSSA, M.; KOHSAKU, M.; PUTTONEN, J. (2007):
Analysis of tension and bending strength of graded spruce timber. Zur Veröffentlichung eingereicht bei Proc. of CIB-W18 Meeting, Paper 40-6-3. Bled, Slovenia. 10.
- HARVEY, P.V.; JONES, E.D. (1989):
In-grade data: A few comparisons. In: In-grade testing of structural lumber. For. Prod. Res. Soc. Madison, USA. 110.
- HOFFMEYER, P. (1995):
Holz als Baustoff. In: STEP 1: Holzbauwerke nach Eurocode 5 – Bemessung und Baustoffe. Arbeitsgemeinschaft Holz e.V. Düsseldorf, Germany. 8.
- ISAKSSON, T.; THELANDERSSON, S. (1995):
Effect of test standard, length and load configuration on bending strength of structural timber. Proc. of CIB-W18 Meeting, Paper 28-6-4. Copenhagen, Denmark. 17.
- ISAKSSON, T. (1996):
Variability of bending strength within timber elements. Licentiate thesis, Dept. of Structural Engineering, Lund Institute of Technology. Lund, Sweden. 264.
- ISAKSSON, T. (1999):
Modelling the variability of bending strength in structural timber – Length and load configuration effects. Report TVBK - 1015, Lund Institute of Technology. Lund, Sweden. 264.
- JOHNSON, L.A.; EVANS, J.W.; GREEN, D.W. (1989):
Volume effect adjustments for the in-grade data. In: In-grade testing of structural lumber. Proc. 47363. For. Prod. Res. Soc. 56-66.
- KÄLLSNER, B.; DITLEVSEN, O.; SALMELA, K. (1997 a):
Experimental verification of a weak zone model for timber in bending. Proc. of IUFRO S5.02 Timber Eng. Meeting. Copenhagen, Denmark. 15.
- KÄLLSNER, B.; SALMELA, K.; DITLEVSEN, O. (1997 b):
A weak zone model for timber in bending. Proc. of CIB-W18 Meeting, Paper 30-10-3. Vancouver, Canada. 12.
- KÄLLSNER, B.; DITLEVSEN, O. (1997):
Stochastic model for bending strength of structural timber. In: Variation of bending strength along structural timber members. Rapport 9712107, Institutet för Träteknisk Forskning. Stockholm, Schweden. 9.
- KUNESH, R.H.; JOHNSON, J.W. (1974):
Effect of size on tensile strength of clear Douglas-fir and Hem-fir dimension lumber. For. Prod. J. 24(8): 32-36.
- LAM, F.; VAROGLU, E. (1990):
Effect of length on the tensile strength of lumber. For. Prod. J. 40(5): 37-42.

LAM, F.; VAROGLU, E. (1991):

Variation of tensile strength along the length of lumber. Part 1: Experimental. Wood Sci. Technol. 25: 351-359.

MADSEN, B.; NIELSEN, P.C. (1976):

In-grade testing. Size investigation on lumber subjected to bending. Structural Research Series, Report No. 15, Dept. Civ. Eng., University of British Columbia. Vancouver, Canada. 14.

MADSEN, B.; NIELSEN, P.C. (1978 a):

In-Grade Testing: Bending tests in Canada. June 1977 - May 1978. Structural Research Series Rep. No. 15, Dept. of Civ. Eng., University of British Columbia. Vancouver, Canada. .

MADSEN, B.; NIELSEN, P.C. (1978 b):

In-grade testing. Tension. Prepared for National Lumber Grades Authority, Dept. of Civ. Eng., University of British Columbia. Vancouver, Canada.

MADSEN, B.; NIELSEN, P.C. (1978 c):

In-grade testing. Accuracy and confidence computer simulation. Structural Research Series, Report No. 21, Dept. Civ. Eng., University of British Columbia. Vancouver, Canada. 14.

MADSEN, B. (1978 a):

NLGA in-grade tension tests: A consolidation of data and reports. University of British Columbia. Vancouver, Canada.

MADSEN, B. (1978 b):

In-grade testing – Problem analysis. For. Prod. J. 28(4): 42-50.

MADSEN, B.; JANZEN, W.; ZWAAGSTRA, J. (1980):

Moisture effects in lumber. Structural Research Series Rep. No. 27. University of British Columbia. Vancouver, Canada. 94.

MADSEN, B.; STINSON, T. (1982):

In-grade testing of timber four or more inches in thickness. Structural Research Series Rep. No. 25, Department of Civil Engineering. University of British Columbia. Vancouver, Canada. 34.

MADSEN, B.; BUCHANAN, A.H. (1985):

Size effects in timber explained by a modified weakest link theory. Proc. of CIB-W18 Meeting, Paper 18-6-4. Beit Oren, Israel. 53.

MADSEN, B.; BUCHANAN, A.H. (1986):

Size effect in timber explained by a modified weakest link theory. Can. J. Civ. Eng. 13(2): 218-232.

MADSEN, B. (1990 a):

Length effects in 38 mm spruce – pine – fir dimension lumber. Can. J. Civ. Eng. 17: 226-237.

MADSEN, B. (1990 b):

Size effects in defect-free Douglas fir. Can. J. Civ. Eng. 17: 238-242.

MADSEN, B. (1991):

Length effects in timber. Proc. of Int. Timber Eng. Conf. London, Great Britain. 2.143-2.150.

MADSEN, B. (1992):

Structural behaviour of timber. Timber Engineering Ltd Vancouver, Canada. 405.

MALHOTRA, S.K.; BAZAN, I.M.M. (1980):

Ultimate bending strength theory for timber beams. Wood Sci. 13(1): 50-63.

MARCHAND, G.E.; FUX, W. (1983):

Statistisch gesicherte Untersuchungen von Festigkeitswerten biegebeanspruchter Bauteile aus Schweizer Holz. SAH Bulletin. Zürich, Schweiz. 3-26.

- MISTLER, H.-L. (1979):
Die Tragfähigkeit des am Endauflager unten rechtwinklig ausgeklinkten Brettschichträgers. Dissertation, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, TH Karlsruhe. 112.
- MISTLER, H.-L. (1982):
Über die Querkzugfestigkeit von Fichten-Brettschichtholz in Abhängigkeit von der Bauteilgröße und der Verteilung der Beanspruchung. Ingenieurholzbau in Forschung und Praxis: 33-40.
- MONNIN, M. (1919):
Essais physiques, statiques et dynamiques des bois. Bull. Sect. Techn. L'Aeronaut. Paris, France.
- NEWLIN, J.A.; TRAYER, G.W. (1924):
Stresses in wood members subjected to combined column and beam action. NACA Report No. 188. 13.
- PATTON-MALLORY, M.; CRAMER, S.M. (1987):
Fracture mechanics: A tool for predicting wood component strength. For. Prod. J. 37(7/8): 39-47.
- PETERSON, J. (1993):
The effect of width on the bending strength of glulam beams. For. Prod. J. 43(3): 27-30.
- PIERCE, F.T. (1926):
Tension tests for cotton yarn. J. Text. I: 155-368.
- PIERCE, C.B. (1976):
The Weibull distribution and the determination of its parameters for application to timber strength data. BRE, CP 26/76. Princes Risborough Laboratory. 20.
- ROUGER, F.; DE LAFOND, C.; EL QUADRANI, A. (1993):
Structural properties of french grown timber according to various grading methods. Proc. of CIB-W18 Meeting, Paper 26-5-1. Athens, USA. 17.
- ROUGER, F.; FEWELL, T. (1994):
Size effects in timber: Novelty never ends. Proc. of CIB-W18 Meeting, Paper 27-6-2. Sydney, Australia. 9.
- SACHS, S.; HEDDERICH, J. (2006):
Angewandte Statistik. Springer-Verlag, Berlin, Germany. 702.
- SCHNEEWEIß, G. (1964):
Der Einfluß von Belastungsart, Auflagerentfernung und Querkdruckfestigkeit auf die Biegefestigkeit. Holz Roh- Werkst. 22(11): 418-423.
- SCHNEEWEIß, G. (1969):
Der Einfluß der Abmessungen auf die Biegefestigkeit von Holzbalken. Holz Roh- Werkst. 27(1): 23-29.
- SHOWALTER, K. (1986):
The effect of length on tensile strength parallel to grain in structural lumber. M.Sc. Thesis, Virginia Polytec Institute and State University. Blacksburg, USA. (zit. Madsen 1990 a)
- SHOWALTER, K.L.; WOESTE, F.E.; BENDTSEN, B.A. (1987):
Effect of length on tensile strength in structural lumber. USDA, For. Prod. Lab., Rept. No. 482. 9.
- STEIGER, R.; ARNOLD, M.; FONTANA, M. (2006):
Revisiting EN 338 and EN 384 basics and procedures. Proc. of CIB-W18 Meeting, Paper 39-6-2. Florence, Italy. 16.
- STÜSSI, F. (1969):
Geschichtlicher Überblick über die Entwicklung der Bemessungsverfahren im Bauwesen. IVBH, Berichte der Arbeitskommissionen, Band 3. 10.

TANAKA, F. (1906):

Auf dem Kongress des IVM in Brüssel. Brüssel, Germany.

TUCKER, J.A. (1927):

A study of the compressive strength dispersion of material with applications. J. Franklin I. 204: 751-781.

VINOPAL, G.W. (1980):

Determination of the combined influence of density and knots on the mechanical properties of full-size structural timber. Proc. of IUFRO S5.02 Wood Eng. Group. Oxford, Great Britain. 79-91.

WAGENFÜHR, R. (1999):

Anatomie des Holzes. Strukturanalytik – Identifizierung – Nomenklatur – Mikrotechnologie. 5. überarbeitete Auflage. DRW-Verlag Weinbrenner GmbH&Co. Leinfelden-Echterdingen, Germany. 188.

WEIBULL, W. (1939 a):

A statistical theory of the strength dispersion of material with applications. Royal Swedish Institute for Engineering Research, Proc. Nr. 141. 45.

WEIBULL, W. (1939 b):

The phenomenon of rupture in solids. Royal Swedish Institute for Engineering Research, Proc. Nr. 153. 55.

WU, E.M. (1967):

Application of fracture mechanics to orthotropic plates. J. Appl. Mech. 34(4): 967-974.

YLINEN, A. (1942):

Über den Einfluß der Probekörpergröße auf die Biegefestigkeit des Holzes. Holz Roh- Werkst. 5(9): 299-305.

ZAKIĆ, B.D. (1973):

Inelastic bending of wood beams. J. Struct. Div. 99: 2079-2095.

Normen:

ASTM D 1990-97:1997. Standard practice for establishing allowable properties for visually-graded dimension lumber from in-grade tests full size specimens. ASTM Annual Book of Standards. Philadelphia, USA. 290-314.

CSA 086-01:2001. Engineering design in wood. Canadian Standard Association.

DIN 1052:1933. Bestimmungen für die Ausführung von Bauwerken aus Holz im Hochbau. Berlin.

DIN 1052:2004-08. Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.), Berlin. 235.

DIN 4074-1:2003-06. Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 1: Nadelschnittholz. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.), Berlin. 22.

DIN 52182:1976-09. Bestimmung der Rohdichte. Normenausschuss Holz (NAHolz) im DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.), Berlin. 3.

DIN EN 384:2004-05. Bauholz für tragende Zwecke – Bestimmung charakteristischer Festigkeits-, Steifigkeits- und Rohdichtewerte. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.), Berlin. 14.

DIN EN 13183-1:2002-07. Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.), Berlin. 6.

EN 1995-1-1:2004-11. Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. CEN/TC 250 Structural Eurocodes. 132.

EN 338:2003-04. Structural timber - Strength classes. CEN/TC 124 Timber structures. 9.

EN 384:2004-01. Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density. CEN/TC 124 Timber structures. 15.

EN 408:2003-08. Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. CEN/TC 124 Timber structures. 32.

ECE:1989. ECE recommended standard for stress grading of coniferous timber. Timber Bull. for Europe. Genf, Switzerland. 1-15.

A. Anhang

Tab. A.1: Literaturstellen zu Festigkeitswerten von ast- und fehlerfreien Prüfkörpern.

Quelle	Jahr	Prüfart - x-Punkt	Holzart	Querschnitt mm ²	Länge mm	Sortierung	n
TANAKA	1906	Biegung -	-	-	-	fehlerfrei	-
CLINE & HEIM	1912	Biegung -	divers	rechteckig	-	fehlerfrei	>200
MONNIN	1919	Biegung -	-	-	-	Holz für den Flugzeug- bau; handelsübl. Bauholz; asthaltige Abfallhölzer	-
NEWLIN & TRAYER	1924	Biegung -	Sitka- Fichte	rechteckig, rund, hohl, I-förmig	-	fehlerfrei	-
YLINEN	1942	Biegung 3	Kiefer	h=0,5...10	6...120	fehlerfrei	-
DAWLEY & YOUNGQUIST	1947	-	-	-	-	fehlerfrei	-
FREAS & SELBO	1954	Biegung -	-	h ≤ 406	-	fehlerfrei	-
COMBEN	1957	Biegung 4	Douglasie	20 x 5...80	80... 1280	fehlerfrei	54
SCHNEEWEIß	1964	Biegung 3&4	Fichte Eiche	35x35	340 380 490	fehlerfrei	26
BOHANNAN	1966	Biegung 3&4	Douglasie	25...152 x 25...305	324... 4115	fehlerfrei	2203
SCHNEEWEIß	1969	Biegung 3	Rotbuche Fichte	2.5..40 x 20 5...130 x 20	300	fehlerfrei	170
KUNESH & JOHNSON	1974	Zug -	Douglasie Hem-Fir	38 x 89...235	3660	fehlerfrei	120
MALHOTRA & BAZAN	1980	Biegung Zug Druck 3&4	Douglasie Fichte	38...89 x 42...287	685... 4115	SS, No.2 (nahezu fehlerfrei)	169
BUCHANAN	1983	Auswertung der Versuche von COMBEN (1957), BOHANNAN (1966), KUNESH & JOHNSON (1974), MALHOTRA & BAZAN (1980)					
MADSEN	1990b	Biegung 3&4	Douglasie	25x25 50x50	360 720	fehlerfrei	100

- = keine Informationen

Tab. A.2: Formeln zur Berücksichtigung des Größeneffektes bei ast- und fehlerfreien Prüfkörpern.

Autor	Jahr	Formel bzw. Höhenfaktor	Erläuterungen
TANAKA	1906	$\sigma_b = \frac{3 \cdot P \cdot \ell}{2 \cdot b \cdot h^n}$	$n \neq 2$, holzartabhängig (YLINEN 1942)
MONNIN	1919	$\sigma_b = \frac{3 \cdot P \cdot \ell}{2 \cdot b \cdot h^n}$	$n=11/6 \dots 10/6$ $n=10/6 \dots 9/6$ $n=9/6 \dots 8/6$ Holz für Flugzeug-/Wagenbau handelsübliches Bauholz stark astige Abfallhölzer (YLINEN 1942)
NEWLIN & TRAYER	1924	$1.07 - 0.07 \cdot \sqrt{\frac{h}{50.8}}$	(BOHANNAN 1966) h in mm Referenzhöhe h = 50.8 mm
DAWLEY & YOUNGQUIST	1947	$0.625 \cdot \left(\frac{(h/50.8)^2 + 143}{(h/50.8)^2 + 88} \right)$	(BOHANNAN 1966) h in mm Referenzhöhe h = 50.8 mm (FEWELL & CURRY 1983)
FREAS & SELBO	1954	$0.73 \cdot \frac{h^2 + 92300}{h^2 + 56800}$	(FEWELL & CURRY 1983) h in mm Referenzhöhe h = 200 mm (FEWELL & CURRY 1983)
BOHANNAN	1966	$\left(\frac{200}{h} \right)^{0.11}$	h in mm, Referenzhöhe h = 200 mm
MADSEN	1990b	$\left(\frac{200}{h} \right)^{0.25}$	h in mm, Referenzhöhe h = 200 mm (gewählt)

Anmerkung: Abkürzungen siehe Abkürzungsverzeichnis S. xvii - xviii

Tab. A.3: Literaturstellen zum Größeneffekt bei Schnittholz.

Quelle -	Jahr -	Prüfart - x-Punkt	Holzart -	Querschnitt mm ²	Länge mm	Sortierung -	n -	
GRAF	1938	Biegung Druck Zug	-	Fichte Kiefer Buche	zahlreiche Einzelversuche			
GRAF & EGNER	1938	Zug	-	Fichte	7 x 20 20 x 50 55 x 110	550 1200	möglichst fehlerfrei	84
BARRETT	1974	Querzug	-	Douglasie	divers	divers	divers	divers
CURRY & TORY	1976	Biegung (1/3 ℓ)	4	schw/fin Redwood/ Whitewood Western Hemlock	38...50 x 100...250	-	III, IV, V, VI SS, No.1, No.2	2958
MADSEN & NIELSEN	1976	Biegung	4	Hem-Fir	38 x 89	1067... 3429	SS, No.1, No.2, No.3, Ausschuss	1499
					38 x 140	1626... 5385		
					38 x 184	2210... 5944		
					38 x 235	2819... 5944		
MADSEN & NIELSEN	1978 (a,b,c)	Biegung (1/3 ℓ)	4	Hem-Fir Douglas Fir-Larch Spruce- Pine-Fir	38 x 89 38 x 140 38 x 184 38 x 235	1513, 2380, 3128, 3995 2640, 3680 2440, 3660, 4270	SS No.2 & besser	> 12000
		Zug	-					
		Druck	-					
VINOPAL	1980	Biegung (1/3 ℓ)	4	South african pine	38 x 114 38 x 152 38 x 228 50 x 152	2394 3192 4788 1000 380 500	-	840
		Zug	-					
		Druck	-					
MISTLER	1982	Querzug	-	Fichte (BSH)	3...60 x 60...1140	-	-	450
MADSEN & STINSON	1982	Biegung (1/3 ℓ)	4	Douglasie	89 x 140/184/286 140 x 184/286/387 184 x 235/286/387	2380... 6579	SS No.1	1684
MARCHAND & FUX	1983	Biegung (1/3 ℓ)	4	Fichte	80 x 140 100 x 180 140 x 200	2520 3240 3600	-	405
FEWELL	1983	Biegung (1/3 ℓ)	4	Redwood/ Whitewood Douglas- Fir Hem-Fir Spruce- Pine-Fir	- x 100...250	1800... 4500	SS Sel No.2	4284

Tab. A.3: Literaturstellen zum Größeneffekt bei Schnittholz (Fortsetzung).

Quelle	Jahr	Prüfart	x-Punkt	Holzart	Querschnitt mm ²	Länge mm	Sortierung	n
SHOWALTER ET AL.	1987	Zug	-	Southern Pine	38 x 89 38 x 235	762 2290 3050	No.2	1000
EHLBECK & COLLING	1987	Biegung	3&4	Fichte (BSH)	100 x 167...1250	3700... 11800	divers	45
MADSEN	1990a	Biegung	4	Spruce-Pine-Fir	38 x 89 38 x 184	780... 4776	No.2 & besser	3640
		Zug	-			457... 3970		
		Druck	-			610... 4889		
LAM & VAROGLU	1990	Zug	-	Spruce-Pine-Fir	38 x 89	2642 3683 4877	SS No.2	770
LAM & VAROGLU	1991	Zug	-	Spruce-Pine-Fir	38 x 89	2640 4880	-	-
GLOS & HENRICI	1993	Biegung (1/3 l)	4	Fichte	50 x 50 50 x 100 50 x 150	900 1800 2700	S 7 S 10 S 13	180
GALLIGAN ET AL.	1993	Zug	-	Hem-Fir	38 x 89	1828 2438 3048 3658	divers	400
			-	Douglasie Hem-Fir	38 x 89 38 x 140 38 x 184 38 x 235	divers		>5000
PETERSON	1993	Biegung	4	Douglasie (BSH)	80...273 x 457	6706 7925 10058	-	43
ROUGER ET AL.	1993	Biegung (1/3 l)	4	Fichte Tanne Douglasie Schwarzkiefer Pinie Pappel	40 x 100 50 x 150 65 x 200	1800 2700 3600	C 18/CF 18 C 22/CF 22 C 30/CF 30	8950
AASHEIM & SOLLI	1995	Biegung (1/3 l)	4	norweg. Fichte (BSH)	90 x 300 90 x 600	5400 10800	T30 der Lamellen	44
KÄLLSNER & DIETLEVSEN	1997	Biegung	4	norweg. Fichte	45 x 120	2160	K15...K30	54
AICHER ET AL.	2002	Querzug	-	Fichte (BSH)	20...140 x 67...528	20...405	-	764

- = keine Information

Tab. A.4: Literaturstellen zum Größeneffekt bei Schnittholz - Auswertung von Fremdversuchen.

Quelle	Jahr	Bezug
BARRETT & FOSCHI	1978	Zusammenstellung von Auswertungen zur Sprödbrechtheorie anderer Autoren
BURY	1979	Auswertung der In-Grade-Versuche (Zug) von Kanada 1977/1978 (MADSEN & NIELSEN 1978)
BURY	1981	Auswertung der In-Grade-Versuche (Biegung) von Kanada 1977/1978 (MADSEN & NIELSEN 1978)
MADSEN & BUCHANAN	1985	Zusammenstellung der Versuche von MADSEN & NIELSEN 1976, MADSEN & NIELSEN 1978, MADSEN & STINSON 1982
BUCHANAN	1986	Auswertung der In-Grade-Versuche von Kanada 1977/1978 (MADSEN & NIELSEN 1978)
BECHTEL	1988	Empirische Entwicklung eines Modells zur Beschreibung des Längeneffektes bei Zugbeanspruchung
FEWELL & GLOS	1988	Auswertung der Daten des Princes Risborough Laboratory (Biegung und Zug)
BARRETT & GRIFFIN	1989	Auswertung der In-Grade-Versuche von Kanada 1977/1978 (MADSEN & NIELSEN 1978) Umrechnung der Daten durch Längenfaktor, dann Berechnung Höhenfaktor
HARVEY & JONES	1989	Auswertung In-Grade-Versuche von Kanada 1977/1978 (MADSEN & NIELSEN 1978) Auswertung des Höheneffektes ohne vorherige Längenkorrektur
JOHNSON ET AL.	1989	Auswertung In-Grade-Versuche von Kanada 1977/1978 (MADSEN & NIELSEN 1978) Anwendung von unterschiedlichen Modellfunktionen
BARRETT & FEWELL	1990	Auswertung von verfügbaren Literaturdaten (MADSEN & NIELSEN 1976, FEWELL & CURRY 1983, SHOWALTER ET AL. 1987, LAM & VAROGLU 1990, MADSEN 1990 a,...) Herleitung eines Größeneffektes (Breite, Höhe, Länge) für Biegung und Zug
BAŽANT ET AL.	1991	Anwendbarkeit der WEIBULL-Theorie auf quasi-spröde Strukturen
CZMOCH ET AL.	1991	Untersuchung zur Festigkeitsverteilung in Bauholz (keine eigenen Versuche)
MADSEN	1991	Auswertung der Versuche von MADSEN & NIELSEN 1976 und LAM & VAROGLU 1990 in Bezug auf den Einfluss der Lage des größten Fehlers und dessen Auswirkung auf den Längeneffekt
BARRETT ET AL.	1992	Auswertung von verfügbaren Literaturdaten (MADSEN & NIELSEN 1976, FEWELL & CURRY 1983, SHOWALTER ET AL. 1987, LAM & VAROGLU 1990, MADSEN 1990 a,...). Herleitung des Größeneffektes (Breite, Höhe, Länge) für Biegung und Zug
MADSEN	1992	Zusammenfassung der Versuchsprogramme zum Größeneffekt
BARRETT & LAM	1994	Zusammenstellung der festigkeitsbeeinflussenden Faktoren

Tab. A.5: Überblick über die in der Literatur verfügbaren Größenexponenten.

Autor	Jahr	Holzart	Sortier- klasse	Exponenten						Erläuterung
				Höhe		Länge		Höhe & Länge		
				$f_{m,mean}$	$f_{m,k}$	$f_{m,mean}$	$f_{m,k}$	$f_{m,mean}$	$f_{m,k}$	
FREAS & SELBO	1954	-	-	$0.73 \cdot (h^2 + 92\,300) / (h^2 + 56\,800)$						zit. FEWELL & CURRY 1983
MADSEN & NIELSEN	1976	Hem Fir	SS			0.157	0.234			zit. MADSEN & BUCHANAN 1985
			No.2 & besser			0.193	0.270			
			No.2			0.158	0.198			
MADSEN & NIELSEN	1978a	Douglas-Fir, Hem Fir, Spruce-Pine-Fir	SS		$1.594 - 0.00297 \cdot h$					zit. FEWELL & CURRY 1983
			No.1 & No.2		$1.608 - 0.00304 \cdot h$					
			No.3		$1.691 - 0.00346 \cdot h$					
			gesamt		$1.631 - 0.00316 \cdot h$					
		Douglas-Fir	SS				0.625			zit. MADSEN & BUCHANAN 1985
			No.2				0.434			
		Hem Fir,	SS				0.417			
			No.2				0.125			
Spruce-Pine-Fir	SS				0.313					
	No.2				0.337					
BURY	1981	Douglas-Fir, Hem Fir, Spruce-Pine-Fir	SS		0.383					zit. FEWELL & CURRY 1983 (Bezugshöhe $h=200$ mm)
			No.1 & No.2		0.361					
			No.3		0.423					
			gesamt		0.403					
BUCHANAN	1983	Spruce-Pine-Fir	SS			0.204	<0.10		zit. MADSEN & BUCHANAN 1985	
			No.2			0.270	0.345			
FEWELL & GLOS	1988	Douglas-Fir, Red-/White-wood, Hem-Fir, Spruce-Pine-Fir, Sitka Spruce	-		0.300				60 < h < 400 (Bezugshöhe $h=200$ mm)	
JOHNSON ET AL.	1989	Douglas-Fir, Hem-Fir, Southern Pine, Spruce-Pine-Fir	SS					0.361	0.451	(Bezugshöhe $h=89$ mm)
			No.2					0.342	0.423	

Anmerkung: Abkürzungen siehe Abkürzungsverzeichnis S. xvii - xviii

Tab. A.5: Überblick über die in der Literatur verfügbaren Größenexponenten (Fortsetzung).

Autor	Jahr	Holzart	Sortier- klasse	Exponenten						Erläuterung	
				Höhe		Länge		Höhe & Länge			
				$f_{m,mean}$	$f_{m,k}$	$f_{m,mean}$	$f_{m,k}$	$f_{m,mean}$	$f_{m,k}$		
BARRETT & GRIFFIN	1989	Douglas- Fir-Larch, Hem-Fir. Spruce- Pine-Fir	SS					0.371	0.528		
			No.2					0.447	0.401		
			No.3					0.486	0.496		
			gesamt	0.235		0.220		0.435	0.475		
		Spruce- Pine-Fir	SS					0.383	0.474		
			No.2					0.385	0.351		
			No.3					0.506	0.510		
			gesamt					0.425	0.445		
EHLBECK & COLLING	1990	Spruce (glulam)	divers	0.150		0.150			(Bezugs- höhe h=300 mm)		
MADSEN	1990a	Spruce- Pine-Fir	No.2 & besser	0.430	0.230	0.170	0.200				
BARRETT & FEWELL	1990	-	-	0.230		0.170		0.400	(Bezugs- höhe h=200 mm)		
GREEN & KRETSCH -MANN	1991			0.296		0.143			(Bezugs- höhe h=184 mm)		
MADSEN	1992	divers	divers			0.200					
BARRETT ET AL.	1992	divers	divers	0.200		0.200					
ROUGER ET AL.	1993	Fichte/ Tanne, Douglas- ie, Pinie	CF 18	-0.150 ... 0.120						unsortiert	
			CF 22	0.200 ... 0.600						maschinell sortiert	
			CF 30								
			CF 18	-0.010 ... 0.010							visuell sortiert
		CF 22	-0.100 ... 0.010								
		CF 30	-0.300 ... -0.500								
ISAKS- SON	1999	Fichte	-			0.070	0.030			unter- schiedliche Lagerarten	
									
						0.110	0.070				
STEIGER ET AL.	2006	Fichte/ Tanne	divers	0.190							

Anmerkung: Abkürzungen siehe Abkürzungsverzeichnis S. xvii - xviii

Tab. A.6: Kollektive getrennt nach Prüffart und Querschnittsabmessungen, n = 6244 PK.

Prüf- art	Quer- schnitt mm ²	n	Kollek- tiv	Prüf- art	Quer- schnitt mm ²	n	Kollek- tiv	Prüf- art	Quer- schnitt mm ²	n	Kollek- tiv
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BF	48 x 24	98	1	BH	40 x 125	59	13	Z	21 x 102	42	20
	50 x 30	97			40 x 190	40			21 x 220	31	
	60 x 40	99			50 x 190	37			22 x 94	30	
	60 x 40	215	2		50 x 80	46			38 x 177	28	
	83 x 45	86	3		60 x 125	67			38 x 188	30	
	108 x 48	133			60 x 190	45			47 x 217	30	
	48 x 24	63	4		60 x 250	50			49 x 104	30	
	50 x 30	170			60 x 80	42			50 x 100	26	
BH	50 x 180	89	5	40 x 190	17	14	50 x 240	26			
	60 x 120	60		40 x 80	83		60 x 180	27			
	63 x 125	34		50 x 125	71		61 x 170	44			
	65 x 190	50		50 x 190	18		75 x 242	20			
	65 x 230	46		50 x 80	69		80 x 180	28			
	80 x 145	49		60 x 190	15		80 x 240	27			
	80 x 190	50		60 x 250	9		35 x 100	40	21		
	85 x 105	50		60 x 80	56		50 x 150	42			
	100 x 240	51		24 x 48	41	15	35 x 110	59	22		
	100 x 245	34		30 x 50	106		35 x 90	49			
	105 x 105	49		60 x 120	52	16	37 x 211	62			
	120 x 180	49		60 x 180	51		37 x 233	59			
	38 x 140	21	6	60 x 240	51		65 x 100	51			
	38 x 183	20		80 x 180	52		42 x 152	99	23		
	38 x 88	20		Z	35 x 90	30	17	44 x 128	100		
	38 x 145	101	7	39 x 110	52	18	38 x 107	112	24		
	38 x 235	118		39 x 220	24		40 x 254	104			
	38 x 90	125		39 x 250	35		43 x 107	104			
	50 x 175	112		42 x 150	54		40 x 115	53	25		
	60 x 80	2	8	46 x 110	52		40 x 235	54			
	50 x 125	2	9	46 x 175	54		40 x 75	49			
	50 x 80	3		46 x 250	51		60 x 115	53			
	40 x 80	7	10	38 x 175	25	19	60 x 235	49			
	40 x 175	53	11	42 x 90	28		60 x 75	46			
	60 x 175	45		50 x 215	27		40 x 250	62	26		
	60 x 235	46					40 x 80	67			
	60 x 75	53					50 x 125	57			
	80 x 115	51					40 x 125	69	27		
80 x 175	52					60 x 125	54				
80 x 235	50										
60 x 120	63	12									
60 x 180	62										
60 x 235	61										
80 x 120	60										
80 x 180	62										
80 x 235	61										

Anmerkung: Abkürzungen siehe Abkürzungsverzeichnis S. xvii - xviii

Tab. A.7: Korrelationskoeffizienten r_{SP} von den Ästigkeiten zur Biegefestigkeit getrennt nach Querschnitt.

	n	DEB	DAB	DEK	tECE	mECE	tKAR	mKAR	E_s1	E_s2	A_s1	A_s2
24x48	41	-0.50	-0.65	-0.38	-0.61	-0.63	-0.57	-0.61	-0.58	-0.38	-0.52	-0.35
30x50	106	-0.71	-0.78	-0.71	-0.78	-0.76	-0.79	-0.77	-0.58	-0.50	-0.61	-0.54
38x140	21	-0.54	-0.33	-0.43	-0.37	-0.53	-0.51	-0.44	0.05	0.12	-0.01	0.16
38x145	101	-0.51	-0.33	-0.38	-0.44	-0.43	-0.41	-0.41	-0.51	-0.42	-0.39	-0.37
38x183	20	-0.51	-0.31	-0.45	-0.46	-0.37	-0.36	-0.42	-0.24	-0.25	-0.18	-0.01
38x235	118	-0.59	-0.67	-0.52	-0.68	-0.64	-0.71	-0.63	-0.70	-0.63	-0.69	-0.64
38x88	20	-0.33	-0.21	-0.19	-0.15	-0.22	-0.17	-0.26	-0.17	-0.12	-0.05	-0.15
38x90	125	-0.45	-0.57	-0.45	-0.72	-0.50	-0.72	-0.49	-0.50	-0.36	-0.57	-0.41
40x125	59	-0.61	-0.75	-0.68	-0.60	-0.70	-0.61	-0.75	-0.62	-0.58	-0.68	-0.61
40x175	53	-0.42	-0.58	-0.62	-0.57	-0.65	-0.66	-0.69	-0.63	-0.60	-0.66	-0.60
40x190	57	-0.49	-0.56	-0.43	-0.56	-0.52	-0.54	-0.50	-0.53	-0.48	-0.61	-0.57
40x80	90	-0.43	-0.51	-0.48	-0.42	-0.59	-0.45	-0.61	-0.54	-0.54	-0.59	-0.58
48x24	161	-0.55	-0.68	-0.41	-0.69	-0.79	-0.73	-0.80	-0.31	-0.12	-0.37	-0.15
50x125	73	-0.57	-0.63	-0.66	-0.58	-0.55	-0.56	-0.57	-0.48	-0.47	-0.58	-0.58
50x175	112	-0.53	-0.57	-0.58	-0.56	-0.61	-0.58	-0.59	-0.61	-0.62	-0.54	-0.57
50x180	89	-0.66	-0.62	-0.61	-0.64	-0.62	-0.61	-0.64	-0.60	-0.61	-0.58	-0.59
50x190	55	-0.43	-0.60	-0.57	-0.58	-0.49	-0.61	-0.54	-0.45	-0.47	-0.63	-0.56
50x30	267	-0.73	-0.75	-0.68	-0.75	-0.82	-0.74	-0.80	-0.57	-0.47	-0.57	-0.48
50x80	118	-0.71	-0.79	-0.78	-0.78	-0.74	-0.81	-0.78	-0.69	-0.63	-0.77	-0.70
60x120	175	-0.36	-0.57	-0.67	-0.57	-0.65	-0.62	-0.66	-0.55	-0.49	-0.57	-0.53
60x125	67	-0.69	-0.69	-0.72	-0.67	-0.69	-0.66	-0.72	-0.68	-0.63	-0.69	-0.67
60x175	45	-0.50	-0.54	-0.59	-0.54	-0.55	-0.54	-0.53	-0.51	-0.49	-0.55	-0.53
60x180	113	-0.53	-0.50	-0.55	-0.52	-0.66	-0.51	-0.63	-0.61	-0.57	-0.48	-0.51
60x190	60	-0.50	-0.38	-0.57	-0.38	-0.43	-0.38	-0.48	-0.47	-0.48	-0.37	-0.38
60x235	107	-0.58	-0.61	-0.61	-0.65	-0.65	-0.67	-0.67	-0.67	-0.66	-0.69	-0.68
60x240	51	-0.20	-0.37	-0.62	-0.58	-0.48	-0.48	-0.49	-0.48	-0.45	-0.47	-0.44
60x250	59	-0.53	-0.52	-0.35	-0.53	-0.47	-0.63	-0.42	-0.50	-0.41	-0.53	-0.43
60x40	314	-0.70	-0.72	-0.73	-0.72	-0.78	-0.73	-0.78	-0.47	-0.30	-0.49	-0.31
60x75	53	-0.59	-0.59	-0.71	-0.65	-0.70	-0.71	-0.73	-0.62	-0.51	-0.64	-0.50
60x80	100	-0.65	-0.75	-0.68	-0.65	-0.69	-0.68	-0.70	-0.63	-0.58	-0.72	-0.63
63x125	34	-0.22	-0.30	-0.56	-0.28	-0.27	-0.08	-0.14	0.12	-0.09	0.04	-0.08
65x190	50	-0.41	-0.57	-0.57	-0.67	-0.59	-0.65	-0.56	-0.57	-0.54	-0.62	-0.57
65x230	46	-0.39	-0.45	-0.54	-0.47	-0.52	-0.53	-0.42	-0.55	-0.53	-0.52	-0.43
80x115	51	-0.21	-0.38	-0.63	-0.54	-0.41	-0.52	-0.43	-0.45	-0.38	-0.49	-0.46
80x120	60	-0.40	-0.36	-0.59	-0.48	-0.64	-0.46	-0.63	-0.52	-0.53	-0.46	-0.48
80x145	49	-0.16	-0.44	-0.57	-0.57	-0.69	-0.52	-0.64	-0.74	-0.71	-0.57	-0.63
80x175	52	-0.50	-0.69	-0.72	-0.70	-0.70	-0.72	-0.66	-0.67	-0.67	-0.63	-0.66
80x180	114	-0.36	-0.42	-0.47	-0.56	-0.52	-0.53	-0.51	-0.46	-0.49	-0.51	-0.53
80x190	50	-0.40	-0.51	-0.66	-0.69	-0.67	-0.65	-0.65	-0.68	-0.65	-0.59	-0.60
80x235	111	-0.47	-0.48	-0.53	-0.61	-0.51	-0.53	-0.54	-0.57	-0.53	-0.55	-0.55
83x45	86	-0.31	-0.64	-0.45	-0.64	-0.55	-0.69	-0.66	-0.37	-0.23	-0.56	-0.43
85x105	50	-0.29	-0.52	-0.47	-0.40	-0.27	-0.40	-0.33	-0.19	-0.09	-0.31	-0.23
100x240	51	-0.15	-0.40	-0.49	-0.27	-0.44	-0.27	-0.41	-0.45	-0.52	-0.44	-0.54
100x245	34	-0.25	-0.26	-0.36	-0.47	-0.52	-0.45	-0.41	-0.42	-0.43	-0.53	-0.51
105x105	49	-0.40	-0.25	-0.63	-0.56	-0.55	-0.44	-0.48	-0.56	-0.55	-0.59	-0.56
108x48	133	-0.21	-0.49	-0.32	-0.53	-0.60	-0.51	-0.58	-0.21	-0.18	-0.26	-0.17
120x180	49	-0.25	-0.31	-0.40	-0.43	-0.45	-0.38	-0.44	-0.46	-0.50	-0.43	-0.46
alle	3899	-0.41	-0.52	-0.56	-0.57	-0.63	-0.59	-0.63	-0.39	-0.34	-0.43	-0.35

Anmerkung: Abkürzungen siehe Abkürzungsverzeichnis S. xvii - xviii

